Aus der Abteilung für Zahnerhaltung
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. Dr. P. Riethe
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Tübingen

KLINISCHE ERFAHRUNGEN MIT DEM MIKROFÜLLER-KOMPOSIT ISOMOLAR (ISO-V)®

Entwicklung eines Meßverfahrens nach dem Moiré-Prinzip zur Quantifizierung der Verschleißfestigkeit okklusionstragender Restorationen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Hartmut Rein
aus Stuttgart

1983

Aus der Abteilung für Zahnerhaltung
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. Dr. P. Riethe
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Tübingen

KLINISCHE ERFAHRUNGEN MIT DEM MIKROFÜLLER-KOMPOSIT ISOMOLAR (ISO-V)®

Entwicklung eines Meßverfahrens nach dem Moiré-Prinzip zur Quantifizierung der Verschleißfestigkeit okklusionstragender Restorationen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Hartmut Rein
aus Stuttgart

1983

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. W. Frommhold
1. Berichterstatter: Professor Dr. Dr. P. Riethe
2. Berichterstatter: Professor Dr. R. Nolden

Offsetdruck Spengler
Lessingstraße 4 · 7401 Neustetten 1
Telefon (0 74 72) 2 21 45

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

		Seite
A.	KLINISCHE UNTERSUCHUNGEN MIT DEM MIKRO-FÜLLER (MF)-KOMPOSIT ISOMOLAR (ISO-V)(R)	1
1.	EINLEITUNG	1
2.	DIE SEITENZAHN-KOMPOSIT-FÜLLUNG	6
3.	MATERIAL UND METHODE	8
3.1.	Komponenten des ISOMOLAR (ISO-V)(R)-Systems	8
3.1.1.	EMAIL-PREPARATOR(R)	8
3.1.2.	CONTACT-RESIN(R)	8
3.1.3.	ISOMOLAR (ISO-V)(R)	9
3.1.4.	Applikationsinstrumentarium	9
3.2.	Klinisches Vorgehen beim Legen der Füllungen	11
3.2.1.	Bestimmung der zentrischen Kontakte	11
3.2.2.	Zahnreinigung	11
3.2.3.	Herstellung einer Form- und Adaptationshilfe	12
3.2.4.	Kariesentfernung	14
3.2.5.	Reinigung und Desinfektion der Kavität	14
3.2.6.	Dentinversorgung	14
3.2.7.	Kavitätenpräparation	16
3.2.8.	Matrizensystem	19
3.2.9.	Relative Trockenlegung	19
3.2.10.	Schmelzvorbehandlung (Conditioning)	20
3.2.11.	Versieglervorstrich	20
3.2.12.	Legen der Füllungen	21
3.2.13.	Ausarbeiten der Füllungen	21
3.2.13.1.	Grobausarbeitung	21
3.2.13.2.	Feinausarbeitung	22
3.2.13.3.	Politur	23
3.2.14.	Abformung der fertigen, polierten Füllungen	25
3.2.15.	Ausgießen der Abdrücke und Aufbewahrung der Modelle	25

Seite

3.2.16.	Fluoridierung	27
4.	EIGENE UNTERSUCHUNGEN	28
4.1.	Klinische Anwendung des Kunststoffes ISO-V(R)	28
4.2.	Nachkontrolle und klinische Untersuchung	30
4.3.	Ergebnisse	31
4.4.	Diskussion der Ergebnisse	33
B.	VERSCHLEISSFESTIGKEITSMESSUNG	34
1.	AUFGABENSTELLUNG	34
2.	LITERATURÜBERSICHT	36
2.1.	Darstellung von Oberflächen in zweidimensionalen Abbildungen	36
2.2.	Anwendung der Moiré-Topographie in der Medizin	37
2.3.	Methoden zur quantitativen Bestimmung des Substanzverlustes von Zahnfüllungen in vivo	38
3.	VERSCHLEISSFESTIGKEITSMESSUNG MITTELS MOIRÉ-TOPOGRAPHIE	40
3.1.	Moiré-Topographie	40
3.2.	Der Moiré-Effekt	40
3.3.	Moiré-Topographie nach Takasaki	42
3.4.	Aufbau der Meßapparatur	47
3.4.1.	Beleuchtung	48
3.4.2.	Gitter	48
3.4.3.	Kamera und fotografisches Material	49
3.5.	Vorbereitung der Modelle zur Fotografie	50
3.6.	Justierung und Eichung der Apparatur	53
3.7.	Durchführung der Moiré-Fotografie	55
3.8.	Auswertung der Aufnahmen	57
3.8.1.	Apparatur	57
3.8.2.	Justierung der Apparatur	57

Seite

3.8.3. Ermittlung der Maßzahlen (Koordinaten der Profilkurven) 59

3.8.3.1. Horizontale Deckung der zu vergleichenden Aufnahmen 59

3.8.3.2. Auffinden von größten Verschleißbereichen 59

3.8.4. Darstellung der Profilkurven und Errechnung der Maxima 60

4. ERGEBNISSE 66

5. DISKUSSION 69

5.1. Diskussion der Ergebnisse 69

5.2. Fehlerdiskussion 70

5.3. Diskussion des Meßverfahrens 73

C. ZUSAMMENFASSUNG 76

D. LITERATURVERZEICHNIS 78

E. ANHANG 84

A. KLINISCHE UNTERSUCHUNGEN MIT DEM MIKROFÜLLER (MF)-KOMPOSIT ISOMOLAR (ISO-V) (R)

1. EINLEITUNG

Neben den Non-Gamma-2-Amalgamen bilden heute die Komposits die wichtigste Gruppe der Materialien, die zur Füllungstherapie Verwendung finden. Letztere haben sich bei der Restoration von Frontzahnläsionen, nicht zuletzt wegen ihrer unkomplizierten Verarbeitungsweise und überlegener Ästhetik, klinisch bewährt.

Zur Diskussion steht die Entwicklung eines Seitenzahnkomposits, das als Amalgamersatz für die Versorgung von klassich präparierten Kavitäten der Klasse I und II verwendbar ist.

Ein Amalgamersatz auf Kunststoffbasis müßte für okklusale und okklusoapproximale Kavitäten folgende Qualitäten aufweisen (LUTZ 1980c):

"1. Amalgamähnliche Verschleißfestigkeit
2. Formstabilität: keine plastische oder elastische Deformation
3. Im Vergleich zu Amalgam deutlich verbesserte marginale Adaptation
4. Für die Erkennung von Imperfektionen ausreichende Röntgenopazität
5. Technisch einfache Verarbeitung
6. Einfache, gegenüber Schmelz nondestruktive Ausarbeitung
7. Zahnähnliches Aussehen ohne Farbänderungs- oder Verfärbungstendenzen"

Beim derzeitigen Stand der Entwicklung in der Polymerchemie lassen sich drei Gruppen von Komposit-Konstruktionen unterscheiden:

- Konventionelle Komposits
- Mikrofüller-Komposits
- Gemischt aufgebaute Komposits

Als k o n v e n t i o n e l l e K o m p o s i t s bezeichnet man die ersten Komposits. Sie bestehen aus einer Mischung von dreidimensional vernetztem organischem Kunststoff und mit diesem durch Silanisierung verbundenen, anorganischen Füllern aus Glas, Quarz oder Keramik (Abb. 1), mit einer Teilchengröße von 0,7 bis 100 µm (BOWEN 1963; Composit-Compendium DMG 1975; LUTZ et al. 1976b; AMEYE 1982).

Klinische und experimentelle Ergebnisse machen deutlich, daß mehrere Gründe gegen ihre Anwendung an Stelle von Amalgam sprechen (LUTZ 1980c):

"- Ungenügende Verschleißfestigkeit
- Mangel an Daten über das Formverhalten
- Unsicherheiten in bezug auf die marginale Adaptation wegen der beschränkten Anwendungsmöglichkeit der Schmelzätztechnik und Schwierigkeiten bei der Verarbeitung
- Fehlende oder zu geringe Röntgenopazität
- Unbefriedigende Oberflächeneigenschaften"

Die M i k r o f ü l l e r - K o m p o s i t s sind gegenüber den konventionellen dadurch gekennzeichnet, daß die mittlere Teilchengröße der beigemischten Mikrofüller 125 bis 150 mal kleiner ist und mit vorzugsweise 40 nm angegeben wird. Der anorganische Füllstoffgehalt in Form von Mikrofüllern macht in erhärtetem Zustand mindestens 50 Gewichtsprozent aus (REHBERG 1978; GROSS 1979; SCHAEFER 1979; AMEYE 1982).

"Die Zumischung der Mikrofüller zur organischen Matrix kann einerseits direkt kolloidal erfolgen, das heißt die Mikrofüller werden wie die anorganischen Füller bei konventionellen Komposits silanisiert und mit dem Monomergemisch

versetzt; und/oder andererseits können die Mikrofüller als sogenannte "organische" Füller in das Komposit eingebracht werden, das heißt als ein mit Mikrofüllern angereichertes Vorpolymerisat, wobei dieses in Splitter- oder Perlenform (Abb. 2 und 3) vorliegen kann" (LUTZ et al. 1981).

Mikrofüller-Komposits sind polierbar, weisen eine klinisch glatte Oberfläche und eine deutlich erhöhte Verschleißfestigkeit auf (MANNERBERG 1977/80; REINHARDT und VAHL 1977/78; MEIER und LUTZ 1978/79/80; RIETHE 1978; RIETHE et al. 1978; JØRGENSEN et al. 1979; NOLDEN 1980; ROULET et al. 1980).

Diese Eigenschaften führten zu experimentellen und klinischen Versuchen, okklusionstragende Restorationen aus Mikrofüller-Komposits herzustellen. Trotz erhöhter Verschleißfestigkeit und verbesserter Oberflächeneigenschaften behalten diese die oben angeführten Schwachpunkte der konventionellen Komposits bei (LUTZ 1980c; RÜMANN und LUTZ 1980).

Die g e m i s c h t a u f g e b a u t e n o d e r h y b r i d e n K o m p o s i t s als weitere Gruppe sind eine Art Zwitter zwischen konventionellen und Mikrofüller-Komposits. Sie haben eine mit Mikrofüller verstärkte organische Matrix und, mit dieser durch Silanisierung verbundene, anorganische Makrofüller (Abb. 4). Dieser Konstruktionstyp ist weniger gut polierbar. Verschleißfestigkeit und die Möglichkeit röntgenopake Partikel beizugeben machen diese Gruppe als Seitenzahnkomposit interessant (AMEYE 1981).

Bei aller Skepsis gegenüber Mikrofüller-Komposits als Amalgamersatz wurden in der vorliegenden Arbeit okklusionstragende Restorationen aus ISOMOLAR (ISO-V)(R) x) (Anhang, S. 85)

---

x) Alle Angaben über die Hersteller der verwendeten Materialien und Geräte befinden sich in alphabetischer Reihenfolge im Anhang.

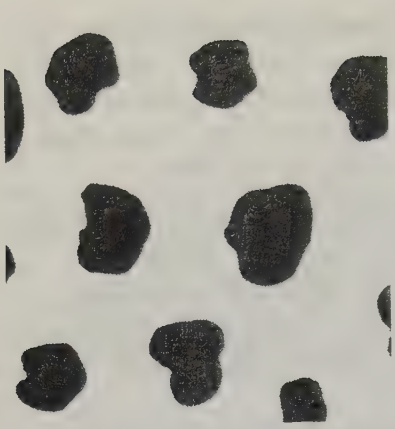


Abb. 1: Konventionelles Komposit: Organische Matrix mit konventionellen, anorganischen Füllern aus Glas, Quarz oder Keramik

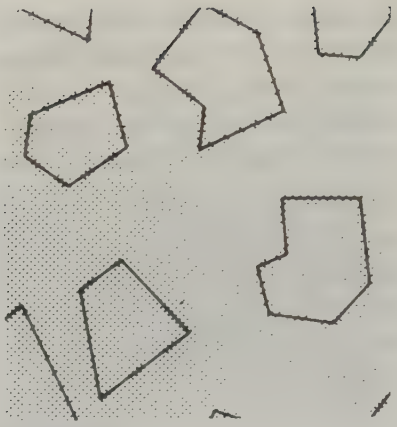


Abb. 2: Mikrofüller-Komposit mit splitterförmigem Vorpolymerisat

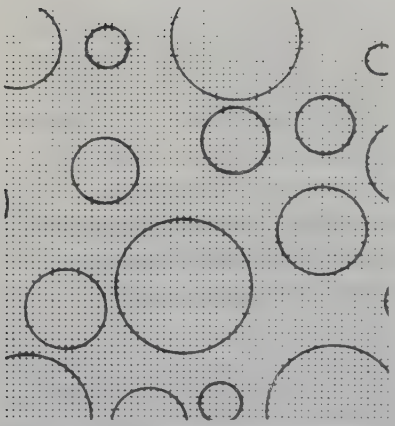


Abb. 3: Mikrofüller-Komposit mit perlenförmigem Vorpolymerisat

Abb. 4: Gemischt aufgebautes Komposit: Mit Mikrofüller verstärkte organische Matrix und konventionelle anorganische Füller

(nach LUTZ et al. 1981, Abb. 2A, 5A, 6A, 8)

im Seitenzahnbereich in vivo untersucht. Fünfundzwanzig Füllungen der Klasse I und II dieses Materials wurden gelegt und nach einem Jahr in situ einer klinischen Prüfung unterzogen. Bei vier Restorationen war eine Nachuntersuchung nach zweieinhalb Jahren möglich. Ein modifiziertes Verfahren der Moiré-Topographie (S. 40) diente zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit für fünf Füllungen nach einem Jahr und vier Füllungen nach zweieinhalb Jahren Tragezeit.

2. DIE SEITENZAHN-KOMPOSIT-FÜLLUNG

Bei der Applikation einer Kunststoffüllung im Seitenzahnbereich stößt man auf eine Reihe von Schwierigkeiten, die durch werkstoffkundliche Begriffe wie Verarbeitungstechnik, Randschluß, Ausarbeitung, Röntgenopazität und Formstabilität definiert werden. In der Folge des technischen Ablaufs beim Legen einer Füllung soll die Problematik kurz dargestellt werden.

Für die Kavitätenform bieten sich die klassische Black-Präparation, die Adhäsions-Präparation und Kombinationen bzw. Modifikationen beider Techniken an. LUTZ (1980c) setzt sich mit diesen Möglichkeiten kritisch auseinander und zeigt durch in vivo und in vitro Studien, daß es praktisch keine andere als die makroretentive, klassische Kastenpräparation gibt, die eine gute Füllungsqualität ermöglicht, wenn man die übliche Ausdehnung der Kariesläsionen im Seitenzahngebiet berücksichtigt. Zur Verbesserung des okklusalen Randschlusses kann in diesem Bereich eine Adhäsionspräparation gewählt werden. Optimale Randverhältnisse erreicht man durch einen Versieglervorstrich und eine zweizeitige Fülltechnik (GWINNETT 1973a; LUTZ 1980c).

Die Kompositinsertion in zwei Schritten beinhaltet auch die Möglichkeit, zwei der Materialien zu kombinieren und dabei approximal röntgenopake und okklusal amalgamähnlich verschleißfeste Füllungen zu legen.

Je nach verwendetem Material ist auch die Applikationstechnik variabel. Die zähe und klebrige Konsistenz z.B. von ISO-V(R) macht die Anwendung einer Applikationsspritze unumgänglich, während ESTIC MICROFILL(R) (Anhang, S. 85) mit einem Spatel in die Kavität eingebracht und gestopft wird. Lichthärtende Materialien wie UVIO-FILL(R) (Anhang, S. 87) müssen schichtweise verarbeitet werden, wenn in der Tiefe die erforderliche Endhärte erreicht werden soll.

Eine optimale Adaptation der Restoration wird schließlich erreicht, wenn der Kunststoff unter einem Kerr-Stempel oder einer Polykarbonatfolie mit digitaler Kompression aushärtet. Die zu erwartende Polymerisationsschrumpfung (1,5 - 2,1 Vol%) erfolgt dann nur von der freien Oberfläche, während die Füllungsränder davon weitgehend verschont bleiben (LUTZ et al. 1976a).

Außerdem führt die Druckbelastung des angemischten Kunststoffes unter einem Kerr-Stempel oder einer Polykarbonatfolie zu einer beträchtlichen Reduktion der Porosität (FINGER und DREYER JØRGENSEN 1977). Eine Polymerisationsinhibition durch Sauerstoff wird ebenfalls unterbunden (FINGER und DREYER JØRGENSEN 1976).

Bei exakter Fülltechnik lassen sich "Überschüsse" nicht vermeiden. Diese müssen nach erfolgter Aushärtung abgetragen werden. Wurde Folie oder Stempel zur Abdeckung verwendet, besteht die Füllungsoberfläche aus der relativ weichen Schicht einer organischen Matrix. Die Oberfläche ist grob und fein auszuarbeiten, um eine verschleißfeste und ästhetisch gute Restoration zu erhalten (MÖRMANN et al. 1977, LUTZ 1980a, b).

Konturierung und Finierung der Füllungsoberfläche einer okklusionstragenden Komposit-Restoration erfordert gegenüber einer Amalgamfüllung eine subtile Technik und einen hohen Zeitaufwand. Die äußerst schwierige Abgrenzung der zahnfarbenen Mikrofüller-Komposits vom Zahnschmelz gefährdet die Zahnhartsubstanz im Sinne einer Schmelzdestruktion bei der Ausarbeitung.

Bei Applikation von 3-flächigen Kunststoffüllungen im Seitenzahnbereich sollte man sich stets bewußt sein, daß Lebensdauer und Verschleiß sich umgekehrt proportional zu deren Oberflächenausdehnung verhalten (METTLER et al. 1978).

3. MATERIAL UND METHODE

3.1. Komponenten des ISOMOLAR (ISO-V)(R)-Systems

Das ISOMOLAR (ISO-V)-System besteht aus dem Conditioner EMAIL-PREPARATOR(R), dem Versiegler CONTACT-RESIN(R), dem Mikrofüller-Komposit ISOMOLAR(R) und einem Applikationsinstrumentarium.

3.1.1. EMAIL-PREPARATOR(R)

Der Conditioner ist eine 30 %ige Orthophosphorsäure von glasklarer Farbe, der mit einem Einmalpinsel (Anhang, S. 85) aufgetragen wird.

3.1.2. CONTACT-RESIN(R)

Der Versiegler besteht aus 65 Gew.% Urethandimethacrylat und 35 Gew.% aliphatischem Dimethacrylat.

Es wird in einem Einmalnäpfchen angemischt, das den Katalysator in kristalliner Form enthält. Diese Methode hat den Vorteil, daß immer ein optimales Mischungsverhältnis Versiegler-Katalysator erreicht und nie zu viel angemischt wird.

Gebrauchsfertiges CONTACT-RESIN(R) liegt in lackähnlicher, klarer, niedrig-visköser Form vor. Mischen und Auftragen kann mit einem Einmalpinsel erfolgen.
Mischzeit: 10 - 20 Sekunden
Verarbeitungszeit: 3/4 - 2 Minuten.

3.1.3. ISOMOLAR (ISO-V)(R)

Das Versuchsmaterial Isomolar (ISO-V)(R) besteht nach Angaben des Herstellers zu 50 % aus Diurethandimethacrylat, einem hochmolekularen bifunktionellen Vernetzer als Kunststoff (Matrix). Die restlichen 50 % sind ein anorganischer Mikrofüller (Korngröße kleiner 1 µm), SiO_2. Der wesentliche Unterschied zu ISOPAST(R) (Anhang, S. 85) ist die disperse Verteilung des Mikrofüllers im Monomer.

ISO-V(R) liegt als Zweikomponenten-System (Base und Catalyst) vor. Catalyst enthält Benzoylperoxid und Base ein tertiäres Amin als Polymerisationskatalysator. Die Pasten werden im Verhältnis 1:1 ca. 30 Sekunden auf dem Mischblock homogen angerührt und anschließend verarbeitet.
Verarbeitungsbreite bei 21°C: ca. 2 Minuten
Erhärtungszeit: ca. 3 Minuten (im Mund entsprechend ca. 5 Minuten ab Mischbeginn)

Die Darreichungsform der Pasten in Spritzen ist nicht nur hygienisch und leicht zu handhaben, sie ermöglicht ebenso eine optimale Entnahme der Pasten.

Die Konsistenz der Pasten ist plastisch, die Viskosität nach dem Anmischen zäh und klebrig.

Prüfwerte (nach Angaben des Herstellers):

Druckfestigkeit nach 24 Std.:	300 N/mm^2
Biegefestigkeit nach 24 Std.:	97 N/mm^2
Vickershärte nach 24 Std.:	240 N/mm^2
Wasseraufnahme nach 7 Tagen :	1,6 %

3.1.4. Applikationsinstrumentarium

Das Applikationsinstrumentarium besteht aus dem COMPOCAP-Applikator, einer Applikationsspritze und roter Kunststoffkappe. Der COMPOCAP-Applikator ist ein aus Metall hergestellter Spritzenhalter mit Stempel.

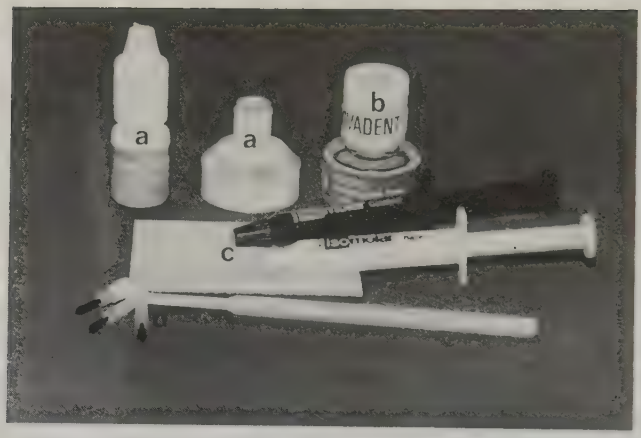


Abb. 5: Komponenten des ISO-V-Systems:
a) Contact-Resin, b) Email-Preparator,
c) Base- und Catalyst-Paste, d) Einmalpinsel

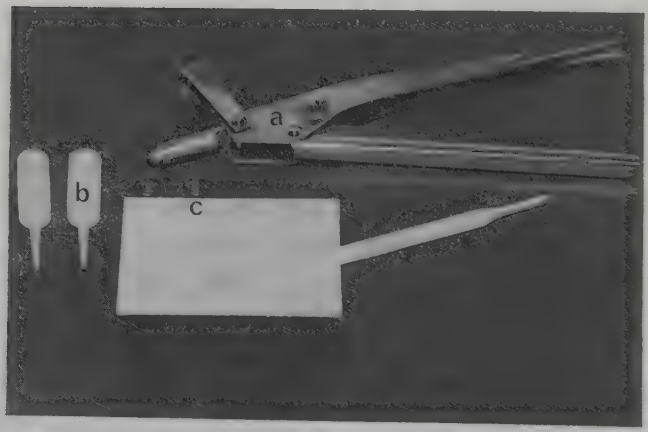


Abb. 6: Applikationsinstrumentarium:
a) Compocap-Applikator, b) Applikationsspritze
c) Kunststoffkappe

Die Applikationsspritze mit Kanüle ist ein aus einem Stück gefertigtes Kunststoffteil, ebenso die Kunststoffkappe.

Zur Applikation von ISO-V(R) wird die gefüllte Spritze auf den mit roter Kappe versehenen Stempel gesteckt und mit einem Bügel befestigt. Die Kanüle wird nach den jeweiligen Erfordernissen gebogen.

Die gesamten Komponenten des ISO-V-Systems sind in Abb. 5 und 6 zusammengestellt.

3.2. Klinisches Vorgehen beim Legen der Füllungen

3.2.1. Bestimmung der zentrischen Kontakte

Vor der eigentlichen Füllungstherapie wurden mit einer Okklusionsfolie (Anhang, S. 86) die zentrischen Stops geprüft und markiert. Die vorhandenen Kontaktpunkte sollten nach der Füllungslegung an die physiologisch richtige Stelle gesetzt werden. Zähne ohne Antagonistenkontakt wurden nicht in die Versuchsreihe aufgenommen.

Neben den Okklusionskontakten wurden auch die Artikulationsbewegungen geprüft und etwaige störende Hyperbalancen an Höckern durch Beschleifen beseitigt. Die späteren Füllungen sollten an diesen Stellen die Arbeitsbewegungen ebenfalls nicht stören.

3.2.2. Zahnreinigung

Die Prinzipien der adhäsiven Restoration kommen nur dann zur Wirkung, wenn eine gereinigte Zahnoberfläche vorliegt (GWINNETT 1973a; LUTZ et al. 1976b).

Deshalb wurden vor der Versorgung eines Zahnes an diesem und seinen Nachbarzähnen die Beläge entfernt und mit Bimssteinpulverbrei auf rotierendem Nylonbürstchen (Anhang, S. 87) die gesamte Oberfläche dieser Zähne gesäubert.

Die Reinigung der Interdental- und Approximalflächen erfolgte mit Strips (Anhang, S. 86).

3.2.3. Herstellung einer Form- und Adaptationshilfe

Für die Insertion von ISO-V(R) war eine Adaptationshilfe unabdingbar. Dazu diente ein individuell hergestellter Stempel aus grünem Kerr Impression Compound(R) (Anhang, S. 86). Bereits vor der Präparation wurde an dem zu versorgenden Zahn ein Matrizensystem (Anhang, S. 86) angelegt, das Kerr-Material in plastischem Zustand auf die Zahnoberfläche gebracht und damit das Okklusalrelief abgeformt. Die Matrize wurde zur Formung des späteren Stempels benötigt, damit dieser beim Legen der Füllung zu reponieren war und genügend okklusaler Druck ausgeübt werden konnte (Abb. 7).

Der abgekühlte Kerr-Stempel ließ sich nach Entfernen der Matrize vom Zahn leicht abheben (Abb. 8).

Bei Zähnen mit zerstörtem Okklusalrelief (defekte Füllung, Sekundärkaries, Höckerfrakturen etc.) wurde der Überschuß im Negativ des Kerr-Stempels mit dem Excavator oder einem Einmalskalpell entfernt.

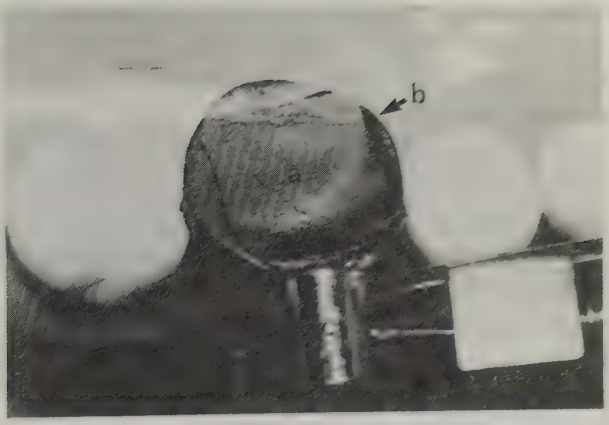


Abb. 7: Zahnärztliches Studienmodell mit
a) Kerr-Stempel, b) Tofflemire-Matrize,
c) Matrizenhalter

Abb. 8: Negativ der Zahnoberfläche im Kerr-Stempel

3.2.4. Kariesentfernung

Bei der Entfernung einer insuffizienten Füllung oder einer Karies wurde eine größtmögliche Schonung der Zahnhartsubstanzen angestrebt. Im Gegensatz zur konventionellen Füllungsmethode kann unterminierter Schmelz, nach Möglichkeit auch entkalkte Bezirke, belassen werden, die eine zusätzliche Haftung ermöglichen (LUTZ et al. 1976a). Ebenso gilt die alte Black'sche Regel "Extension for prevention" nicht, da durch die Versiegelung der angrenzenden Schmelzbezirke bei der adhäsiven Restoration eine Karieshemmung erwartet werden kann (LUTZ et al. 1976a).

3.2.5. Reinigung und Desinfektion der Kavität

Die Reinigung und Desinfektion der Kavitäten wurde mit Chlorhexidindiglukonat 0,1 % (Anhang, S. 84) durchgeführt. Nach LUTZ et al. (1976b) ist dies die schonendste und effektivste Dentinreinigung, bei der sowohl die Keimzahl in der Kavität reduziert, als auch Dentinspäne und Dentinliquor entfernt werden, ohne die Tubulusstruktur des Dentins zu verändern.

3.2.6. Dentinversorgung

Die Unterfüllung bei der Schmelzätztechnik hat folgende Aufgaben:

- Medikamentöse Versorgung der Dentinwunde
- Schutz des Dentins vor Einwirken der Ätz-Säure während der Anätzphase (Abb. 9 und 10). Die Orthophosphorsäure könnte sonst in die Dentinkanäle eindringen und diese erweitern (GWINNETT 1973b, BRÄNNSTRÖM und JOHNSSON 1974; LUTZ et al. 1976b)

Abb. 9: Normales Dentin mit Dentintubuli (nach Prof. Riethe), REM-Aufnahme, Vergr. 1:6000

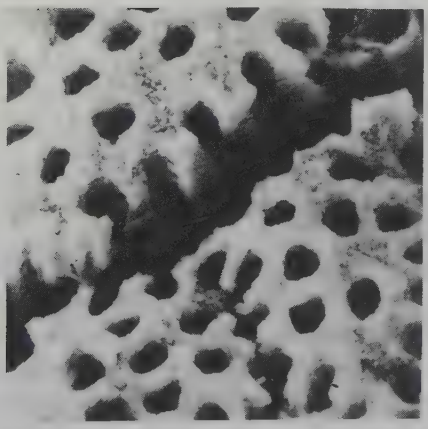


Abb. 10: Erweiterte Dentintubuli durch Säureätztechnik bei fehlender Unterfüllung (nach Prof. Riethe), REM-Aufnahme, Vergr. 1:4000

- Direkte Pulpaschädigung durch Orthophosphorsäure
- Schutz der Pulpa vor einer eventuellen Materialtoxizität (Monomerschädigung)

In der vorliegenden Arbeit wurde zur Dentinversorgung ein Calciumhydroxyd-Zement REOCAP(R) (Anhang, S. 86) verwendet. Den Untersuchungen von RIETHE et al. (1978) zufolge ist dieses Material pulpaschonend und erfüllt die oben genannten Forderungen.

Am besten läßt sich REOCAP(R) mit einem kleinen Kugelstopfer oder einer Sondenspitze in die Kavität einbringen. Dabei wird das gesamte freiliegende Dentin abgedeckt. Überschüsse lassen sich mit der Sonde oder einem Spatel leicht absprengen.

Durch die Mundfeuchtigkeit wird REOCAP(R) innerhalb einer Minute fest und bildet eine widerstandsfähige Schutzschicht. Bei sehr tiefen Kavitäten wurde zusätzlich eine Phosphatzement-Unterfüllung (Anhang, S. 85) gelegt, um einerseits das Volumen der späteren Kunststoffüllung möglichst klein zu halten (die Polymerisationsschrumpfung bleibt gering) und andererseits zu vermeiden, daß bei einer späteren Entfernung der Füllung die Pulpa iatrogen eröffnet wird, weil keine Demarkationslinie Kunststoff - Zahn vorlag.

3.2.7. Kavitätenpräparation

Bei der Kavitätenpräparation (Abb. 11 und 12) mußte in allen Fällen auf die reine Adhäsionspräparation, wie sie von LUTZ et al. (1976a) angegeben wird, verzichtet werden. Bei fast allen zu versorgenden Zähnen war eine defekte Amalgamfüllung zu entfernen, die die Kavitätenform von vornherein festlegte. Die konventionelle Form wurde wie folgt modifiziert: Unterminierter Schmelz wurde belassen, die Kavitätenecken abgerundet und nach Legen der Unterfüllung (S. 14) die Kavitätenränder im okklusalen Bereich abgeschrägt. Die

approximale Stufe und die Ränder in diesem Bereich wurden von der Abschrägung ausgespart (Abb. 11). Das Matrizensystem verhindert hier das Ausfließen der Federränder. Außerdem läßt das meist ungenügende Schmelzangebot im Bereich der horizontalen Stufe und die nicht vorhandene Dentinhaftung keine andere als die makroretentive, klassische Kastenpräparation zu. Die Präparation wurde mit Turbine (Anhang, S. 86) und FG-Diamanten (Anhang, S. 84) vorgenommen, die Ränder mit Winkelstück (Anhang, S. 85) und Finierdiamanten (Anhang, S. 84) oder Arkansas-Steinchen (Anhang, S. 84) nachgearbeitet und finiert.

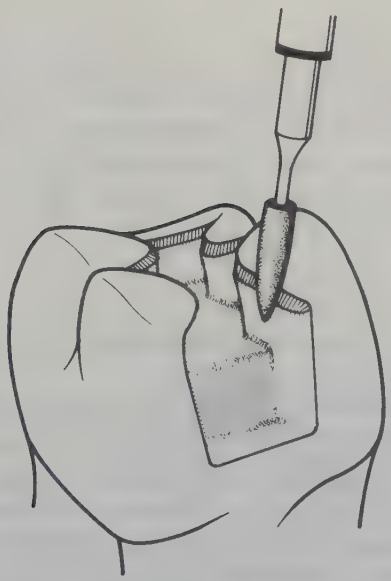


Abb. 11: Darstellung der Kavitätenpräparation: Belassung des unterminierten Schmelzes, abgerundete Kavitätenecken, abgeschrägte Kavitätenränder im okklusalen Bereich. Kein Federrand am approximalen Kavitätenrand.

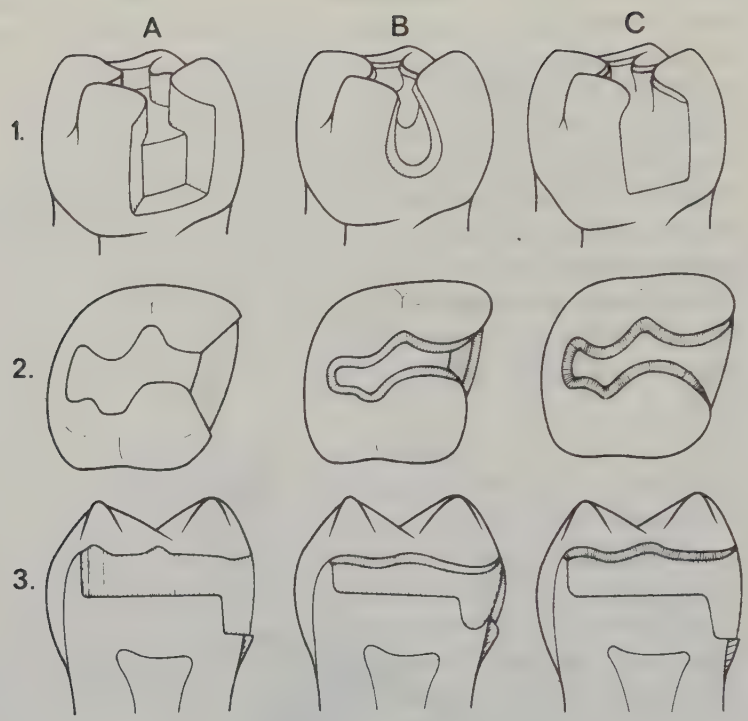


Abb. 12: Überblick der möglichen Kavitätenformen (mesial-okklusal):
1. Reihe, Ansicht von mesial. A) klassische Kastenpräparation, B) Adhäsionspräparation, C) modifizierte, klassische Kastenpräparation
2. Reihe, Ansicht von okklusal. A) klassische Kastenpräparation, B) Adhäsionspräparation, C) modifizierte, klassische Kastenpräparation
3. Reihe, Längsschnitt. A) klassische Kastenpräparation, B) Adhäsionspräparation, C) modifizierte, klassische Kastenpräparation.

3.2.8. Matrizensystem

Die Verwendung eines Matrizensystems (Anhang, S. 86) war aus mehreren Gründen notwendig:

- Es diente der approximalen Formung der Füllung und verhinderte Überschüsse am approximal-gingivalen Kavitätenrand.
- In Verbindung mit Interdentalkeilen wurde weitgehend eine relative Trockenheit gewährleistet.
- Die Gefahr einer Anätzung von Nachbarzähnen entfällt.

Nach dem Anlegen des Matrizensystems wurden approximal Holzkeile (Anhang, S. 84) eingebracht und das Matrizenband bei Bedarf bombiert, um Approximalkontakte an den gewünschten Stellen zu erhalten.

Holzkeile bieten Schutz gegen approximales Überstopfen und hemmen die Sulkusflüssigkeit auf dem Weg in die Kavität. Sie separieren bei entsprechender Verkeilung die Zähne, so daß ein satter approximaler Kontaktpunkt trotz Polimerisationsschrumpfung des Kunststoffes erreicht wird.

3.2.9. Relative Trockenlegung

Bei Füllungen im Seitenzahngebiet konnte keine absolute Trockenlegung (Cofferdam), wie sie im Frontzahngebiet üblich ist, erreicht werden (MEURMANN und HELMINEN 1974; LUTZ et al. 1976b; RAU 1977). Die relative Trockenlegung wurde mittels der sog. "Austauschtechnik" mit Watterollen (Anhang, S. 84) durchgeführt. Um Feuchtigkeit durch die Atemluft zu verhindern, fanden ES-Kompressen (Anhang, S. 85) Verwendung.

3.2.10. Schmelzvorbehandlung (Conditioning)

Nach dem Anlegen des Matrizensystems (s. 3.2.8.) und relativer Trockenlegung (s. 3.2.9.) wurde mit dem Einmalpinsel (Anhang, S. 85) EMAIL-PREPARATOR(R) über die Präparationsgrenze hinaus auf den angeschrägten Schmelz aufgetragen.

Die Ätzzeit betrug 1 Minute (SILVERSTONE 1974; LUTZ et al. 1976b). Unter ständiger Absaugung wurde für die Dauer von 20 Sekunden mit ölfreiem Wasserspray die Säure weggewaschen und danach die Kavität sorgfältig getrocknet. Um nach dem Absprühen eine Kontamination der Kavität mit Speichel zu vermeiden, erfolgte Watterollenwechsel.

3.2.11. Versieglervorstrich

In vitro Versuche machen die Notwendigkeit eines Versieglers deutlich:

"Die Applikation eines Versieglervorstriches ist unumgänglich, um eine perfekte, randspaltfreie Füllung zu erhalten" (LUTZ 1980c). Die Benetzung der Kavitätenwand wird dadurch verbessert und die Adaptation von Kunststoffüllungen sowohl bei der Säure-Ätz-Technik als auch bei konventioneller Kastenpräparation begünstigt.

Aufgrund der Kapillarkräfte wird durch den Versiegler die gesamte verbliebene approximale Schmelzoberfläche benetzt und somit versiegelt.

Der nach Angabe des Herstellers angemischte Versiegler wurde mit einem Einmalpinsel aufgetragen. Wichtig dabei war das Benetzen über die Präparationsgrenze hinaus, um die angrenzenden Bereiche mit zu versiegeln. Der Versiegler wurde wegen seiner großen Polymerisationsschrumpfung in dünner Schicht aufgetragen, danach die Kavität mit dem Luftbläser ausgeblasen.

3.2.12. Legen der Füllungen

Sofort nach dem Versieglervorstrich wurden gleiche Mengen Basis- und Catalyst-Material ca. 30 Sekunden homogen vermischt, in die Applikationsspritze gefüllt und in die Kavität eingebracht. Dabei wurde zuerst die distale Seite, dann die mesiale Seite und zum Schluß der okklusale Teil mit genügend Überschuß gefüllt. Es erfolgte die digitale Kompression mit Hilfe des vorher angefertigten Kerr-Stempels.

5 Minuten nach Anmischbeginn konnte mit dem Ausarbeiten der Füllung begonnen werden.

Beim Stopfen kamen außer dem Kerr-Stempel keine weiteren Stopfinstrumente zur Anwendung, weil der Kunststoff stark viskös und zudem sehr klebrig war.

3.2.13. Ausarbeiten der Füllungen

Bei der Ausarbeitung von Kompositfüllungen lassen sich im wesentlichen drei Arbeitsgänge unterscheiden:
- Grobausarbeitung
- Feinausarbeitung
- Politur

Es ist darauf zu achten, daß diese Reihenfolge bei der Ausarbeitung eingehalten wird (MÖRMANN et al. 1977; LUTZ 1980c).

3.2.13.1. Grobausarbeitung

Das Komposit benetzt den geätzten und versiegelten Schmelz ideal und fließt unter Bildung von Federrändern bis auf die unpräparierte Zahnoberfläche aus. Diese Überschußbildung wird noch verstärkt durch die Kompression, die in den ersten Phasen der Aushärtung zur Verbesserung der Adapta-

tion erforderlich ist. Es ist deshalb klinisch nahezu unmöglich, stets überschußfreie, optimal adaptierte Restorationen zu legen (HIETANEN und RAUTANEN 1976; Mc CABE und CADDICH 1978; LUTZ 1980c).

Zur Abtragung der Überschüsse empfehlen LUTZ (1980c), wie auch NEWESELY und VENZ (1977) Wolfram-Carbid Finierer, die hochtourig und unter Wasserspray arbeiten. Ersterer befürwortet auch Präparierdiamanten, die wegen ihrer guten Schleifleistung dem unter Zeitdruck stehenden Zahnarzt entgegenkommen.

Diese relativ groben Schleifkörper beschädigen jedoch den Schmelz und sollten deshalb nicht im Bereich der Kavitätenränder eingesetzt, sondern ausschließlich zum Entfernen überschüssigen Füllungsmaterials verwandt werden.

3.2.13.2. Feinausarbeitung

Hierbei wird der Füllung ihre durch Funktion und Ästhetik bestimmte Form gegeben und in einem weiteren Schritt die Füllungsränder definitiv ausgearbeitet und finiert.

Um Substanzverluste am Schmelz möglichst klein zu halten und Destruktionen im Füllungsbereich zu vermeiden, müssen Konturier- und Finierdiamanten drucklos und locker wischend geführt werden. Es ist unbedingt auf ausreichende Wasserkühlung zu achten, da wegen Hitzeentwicklung und Schmiereffekten die Kantenschärfe der Diamanten leidet.

Bei der Feinausarbeitung wurde darauf geachtet, eine möglichst funktionelle Kaufläche zu erzielen. Mit Okklusionsfolie (Anhang, S. 86) konnten die Kontaktpunkte an physiologische Stellen gelegt werden. Zudem wurde ihre Lage im Protokoll festgehalten, um bei der geplanten späteren Verschleißfestigkeitsmessung eine Orientierung über die beanspruchten Füllungspartien zu haben.

Gearbeitet wurde mit Winkelstück-Diamanten (Anhang, S. 84) sowie mit weißen Arkansas-Steinchen (Anhang, S. 84). Sie gewährleisteten ein gutes Finieren der Ränder unter besonderer Schmelzschonung.

Wegen der zahnähnlichen Farbe des Kunststoffes war es für das unbewaffnete Auge oft schwer, den Übergang zwischen Zahn und Füllung genau zu erkennen.

3.2.13.3. Politur

Bei den MF-Komposits ist das Problem der Politur gelöst. Sie sind echt polierbar (RIETHE 1978; MEIER und LUTZ 1979). Die Homogenität bleibt erhalten, die beim Ausarbeiten erzielte feine Oberflächenqualität bleibt bestehen und eine Tendenz zur Selbstglättung bei der Beanspruchung im Mundmilieu wurde beobachtet (REINHARDT und VAHL 1978).

Zur Politur wurde eine schmelzschonende Polierpaste (Anhang, S. 86) verwendet, zunächst mit Silikonpolierern (Anhang, S. 87), dann mit Gummikelchen (Anhang, S. 86) appliziert. Mit dieser Methode ließ sich eine homogene, auch im trockenen Milieu Hochglanz tragende Füllung herstellen, mit keinem spürbaren Übergang vom Füllungsrand zum Zahn bei Sondenprobe.

Als typisches Beispiel für das klinische Vorgehen ist die Versorgung eines Molaren mit ISO-V$^{(R)}$-Füllung dargestellt (Abb. 13 und 14).

Abb. 13: Pat. M.F., 24 J., Zahn 36, klinisches Bild nach mod-Kavitätenpräparation und Dentinversorgung

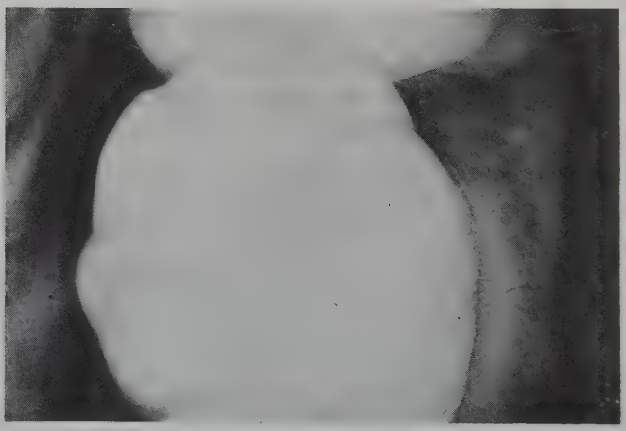


Abb. 14: Pat. M.F., 24 J., Zahn 36 nach abgeschlossener Versorgung

3.2.14. Abformung der fertigen, polierten Füllungen

Die fertig gelegten und polierten Füllungen wurden in der gleichen Sitzung mit einem Korrekturabdruck aus Silikonmaterialien verschiedener Viskosität abgeformt. Die Oberflächenreproduktion wird als gut bezeichnet (MEINERS 1977).

Alle Abdrücke wurden genau nach den Vorschriften des Herstellers und durch denselben Behandler genommen. Halbe, perforierte Metall-Löffel (Anhang, S. 85), mit einem Haftlack (Anhang, S. 85) beschichtet, dienten dem Einbringen des Erstabdruckmaterials Silaplast (Anhang, S. 87) in den jeweiligen Quadranten des Gebisses. Die abzuformenden Zähne sind zuvor gut getrocknet worden.

Für den Korrekturabdruck wurde der ausgehärtete Erstabdruck mit einem Skalpell so beschnitten, daß ein einwandfreies Reponieren möglich war. Vor dem Korrekturabdruck mit Silasoft (Anhang, S. 87) erfolgte eine Reinigung des Erstabdrucks mit Wasser und Alkohol. Es wurde außerdem darauf geachtet, daß die entsprechenden Füllungen vor dem Abdruck speichelfrei und trocken waren. Der Zweitabdruck wurde nach dem Einbringen nur fünf Sekunden lang einem erhöhten Abformdruck ausgesetzt, da diese Maßnahme für die Dimensionstreue des Abdrucknegativs von größter Bedeutung ist (MEINERS 1977). Der fertige Abdruck wurde nach der Reinigung mit Wasser getrocknet und optisch mit freiem Auge geprüft. Bei Mängeln erfolgte eine Wiederholung der Abformung.

3.2.15. Ausgießen der Abdrücke und Aufbewahrung der Modelle

Die initiale Schrumpfung der Abdruckmaterialien bleibt nach 2 Stunden konstant, weshalb die Abdrücke erst nach Ablauf dieser Zeit ausgegossen wurden (EICHNER 1981).

Zum Ausgießen wurde ein Spezialhartgips (Anhang, S. 87) verwendet, der sich wegen feiner Zeichnung und guter Lager-

fähigkeit am besten zur Replika-Herstellung eignete. Das Gips-Wasser Verhältnis wurde genau nach den Angaben des Herstellers gewählt, dann der Gipsbrei 30 Sekunden im Vakuumrührwerk gemischt und schließlich auf dem Vibrator in den Abdruck gebracht.

Am nächsten Tag wurden die Modelle aus den Abdrücken herausgenommen und so getrimmt, daß nach Möglichkeit immer ein Zahn vor und einer hinter dem zu untersuchenden stehen blieb. Abschließend erhielten die Modelle einen Sockel aus Blaugips (3 x 2 x 1,5 cm) mit Hilfe eines selbst hergestellten Sockelformers aus Silikon (Abb. 15).

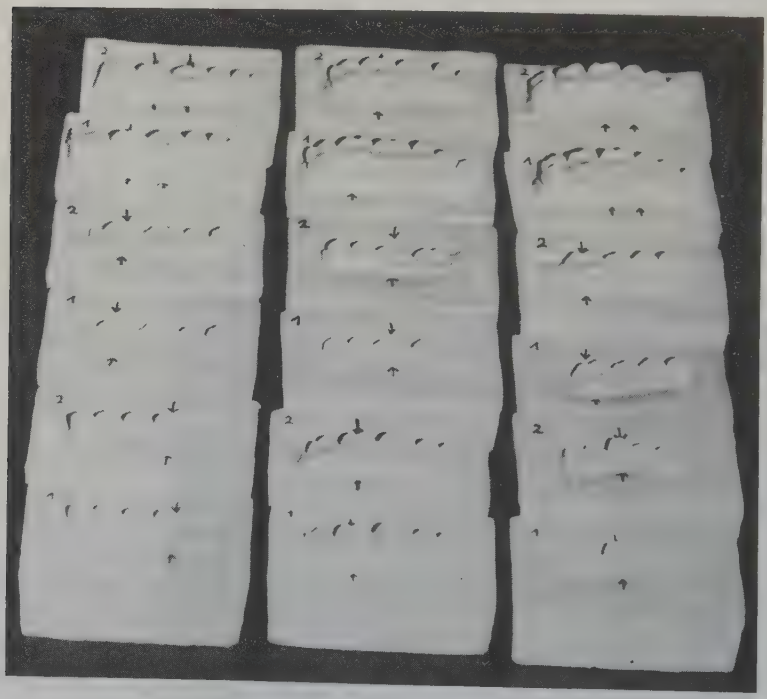


Abb. 15: Gipsmodelle
1) Replika sofort nach Füllungslegung
2) Replika nach einjähriger Tragezeit

Nach Aushärten des Gipses wurden die Modelle beschriftet und zur Aufbewahrung in einen Trockenschrank mit konstanter Temperatur von 21°C gebracht.

Eine minimale Volumenänderung des Gipses kann jedoch trotz gleichbleibender Lagerung nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

3.2.16. Fluoridierung

Der karieshemmende Effekt einer Adhäsiv-Füllung wird durch eine Fluoridierung des behandelten Zahnes erweitert (LUTZ et al. 1976b; LUTZ 1977).

Gleichzeitig wird die Reparation des geätzten, nicht versiegelten Schmelzes beschleunigt.

Die fertig ausgearbeitete Füllung wurde nach dem Korrekturabdruck nochmals trockengelegt und ihre Ränder mit ELMEX FLUID(R) (Anhang, S. 85) touchiert.

4. EIGENE UNTERSUCHUNGEN

4.1. Klinische Anwendung des Kunststoffes ISO-V(R)

Es wurden acht Patienten mit 25 Kompositrestorationen aus ISO-V(R) Material im Seitenzahngebiet versorgt (Tab. 1 + 2).

Tabelle 1: Verteilung der Füllungen auf die Zahnart

Patienten-anzahl	Anzahl der Füllungen	Anzahl der Prämolaren-Füllungen	Anzahl der Molaren-Füllungen
8	25	11	14

Tabelle 2: Übersicht der Art und Anzahl gelegter Füllungen im Seitenzahngebiet mit ISO-V(R)

Füllungsart	o	mo	do	mod
Füllungsanzahl	3	1	4	17

Von jedem Patienten wurde vor der Behandlung ein Erhebungsbogen (Abb. 16) ausgefüllt, wobei folgende Punkte berücksichtigt wurden:

- behandelter Zahn
- Art der gelegten Füllung (ein-, zwei- oder dreiflächig)
- Okklusionsverhältnisse, Lage der Kontaktpunkte
- spezielle Beanspruchung der gelegten Füllung durch Parafunktionen u.a.
- Zahnbeläge
- Mundhygiene

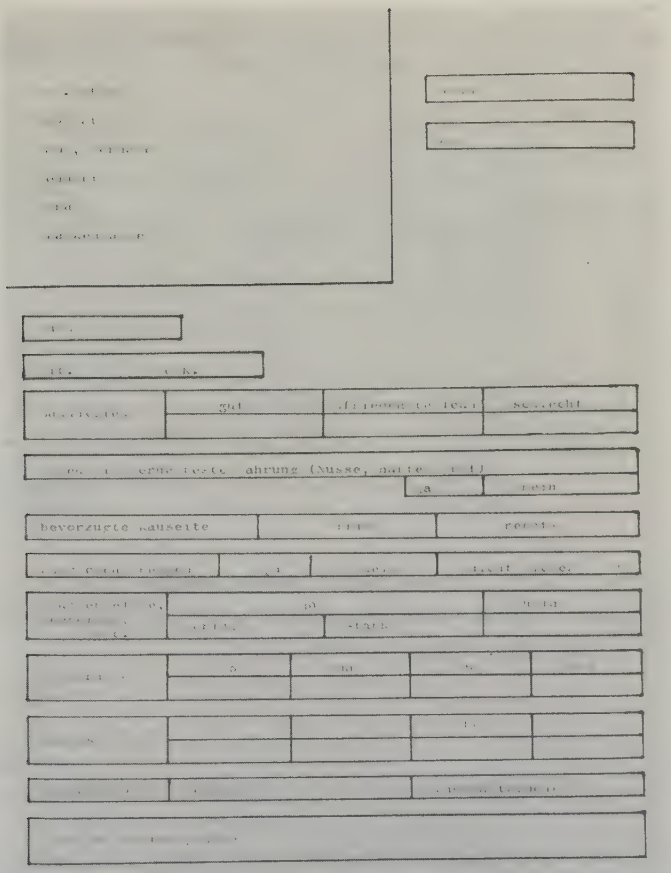


Abb. 16: Erhebungsbogen (eigene Zusammenstellung)

Vor dem Legen der Füllungen sowie bei jeder Nachkontrolle erfolgte eine Vitalitätsprobe des betreffenden Zahnes mit CO_2-Schnee. Alle vor der Behandlung positiv reagierenden Zähne waren auch bei der Nachuntersuchung noch vital.

Als Unterfüllungsmaterial fand immer REOCAP(R) Verwendung. Bei sehr ausgedehnten Kavitäten wurde - um die Polymerisationsschrumpfung möglichst gering zu halten - zusätzlich HARVARD-ZEMENT(R) (Anhang, S. 85) verwendet (Tab. 3).

Tabelle 3: Verwendetes Unterfüllungsmaterial bei den 25 Seitenzahnfüllungen

Unterfüllungs-material / Füllungsart	Reocap	Reocap und Harvard-Zement
o (n = 3)	3	-
mo (n = 1)	1	-
do (n = 4)	3	1
mod (n = 17)	11	6
Gesamt	18	7

In der ersten Behandlungssitzung wurden die Patienten zu Mundhygienemaßnahmen motiviert und die Mundpflege in den folgenden Sitzungen kontrolliert.

4.2. Nachkontrolle und klinische Untersuchung

Die Nachkontrolle erstreckte sich über ein Jahr. Sie beinhaltete eine Qualitätsbegutachtung nach ausreichender Trokkenlegung mit Spiegel, Sonde und Okklusionsfolie (Anhang, S. 86) sowie eine Abdrucknahme.

Bei vier Füllungen konnte eine weitere Untersuchung nach zweieinhalb Jahren durchgeführt werden.

Auf folgende Kriterien wurde geachtet:
- Füllungsfrakturen
- Randspalten
- sichtbare Substanzverluste im okklusalen Bereich
- okklusale Kontaktpunkte
- Verfärbungen (einzelne farbige Einlagerungen)

4.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen die folgenden Tabellen (4 und 5):

Tabelle 4: Ergebnisse nach 1 Jahr Nachuntersuchungszeit an 25 Seitenzahnfüllungen mit ISO-V(R)

Füllungsart / Begutachtungskriterien	o	mo	do	mod	Gesamt
klinische unveränderte Füllungen	2	1	3	8	14
Füllungsfrakturen	-	-	-	-	-
Randspalten	-	-	-	-	-
Substanzverlust im okklusalen Bereich	-	-	1	6	7
Verlust des okklusalen Kontaktes	-	-	-	3	3
Punktförmige farbige Einlagerungen	1	-	-	4	5

Tabelle 5: Ergebnisse nach 2 1/2 Jahren Nachuntersuchungszeit an 4 Seitenzahnfüllungen mit ISO-V(R)

Füllungsart / Begutachtungskriterien	o	mo	do	mod	Gesamt
klinisch unveränderte Füllungen	-	-	-	4	4

Einen Eindruck über das klinische Erscheinungsbild einer mod-Füllung an Zahn 36 bei Pat. M.F. (vgl. Abb. 14) nach 1- und 2 1/2-jähriger Tragezeit vermitteln Abb. 17 und 18.

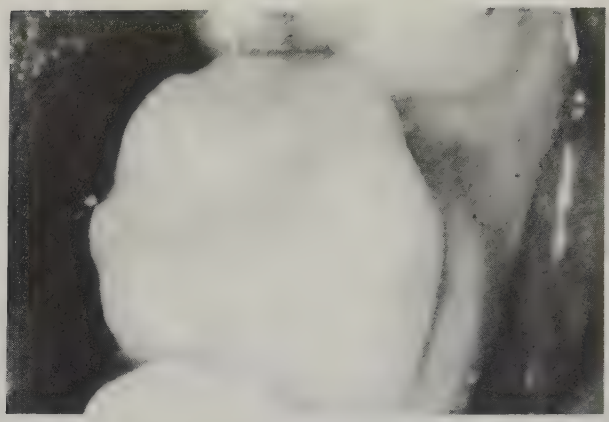


Abb. 17: Pat. M.F., 25 J., Zahn 36 (vgl. Abb. 14), klinisches Bild nach einem Jahr

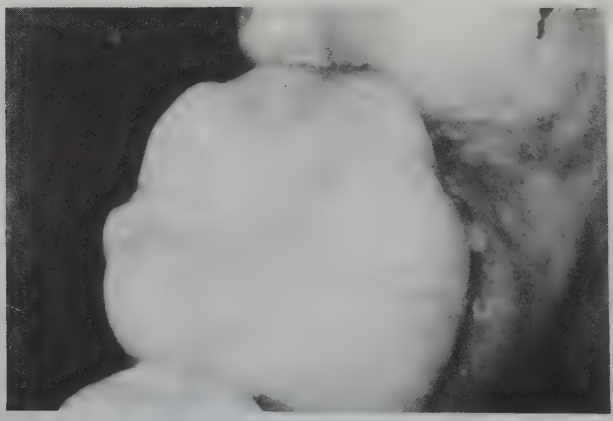


Abb. 18: Pat. M.F., 26 J., Zahn 36 (vgl. Abb. 14 und 17), klinisches Bild nach zweieinhalb Jahren

4.4. Diskussion der Ergebnisse

Bei der klinischen Nachuntersuchung der Füllungen nach einem Jahr konnte der Gesamteindruck als gut bezeichnet werden. Füllungsfrakturen traten nicht auf. Von den 25 gelegten Restorationen waren 14 bei der Prüfung mit Spiegel, Sonde und Okklusionsfolie klinisch unverändert.

Bei sieben Füllungen ergaben sich sicht- und tastbare Substanzverluste im okklusalen Bereich. Dabei handelte es sich einerseits um umschriebene, schicht- oder kraterförmige Absplitterungen, andererseits um verlorengegangene Federränder, die an einzelnen Stellen über die Präparationsgrenze hinausgelaufen waren (Demarkationsproblem). Dies führte zu "positiven" Stufenbildungen, die retentionsfördernd wirkten und verstärkt zu Verfärbungen führten.

Einzelne, farbige Einlagerungen in Poren und Farbänderungen der gesamten Füllung müssen getrennt gesehen werden, wobei die Gesamtverfärbung mangels Objektivierbarkeit nicht beurteilt wurde.

Farbige Einlagerungen konnten bei fünf Füllungen festgestellt werden. So wurden durch diese Verfärbungen Verarbeitungsfehler bei der Füllungslegung sichtbar: Lufteinspaltelung und/oder sofort nach der Ausarbeitung bzw. nach einer gewissen Nutzperiode zutage getretene Poren (FINGER und DREYER JØRGENSEN 1977). Mit der Okklusionsfolie waren die zentrischen Kontakte bei drei Restorationen nicht mehr nachweisbar.

Nach zweieinhalb Jahren konnten mangels Erreichbarkeit der Patienten nur noch vier Füllungen nachuntersucht und beurteilt werden. Alle vier waren noch in einem klinisch einwandfreien Zustand.

Als Nachteil des verwendeten Mikrofüller-Komposits ist die fehlende Röntgenopazität anzusehen, da dadurch Sekundärkaries, Imperfektionen und Überschüsse nicht klar zu diagnostizieren sind.

B. VERSCHLEISSFESTIGKEITSMESSUNG

1. AUFGABENSTELLUNG

Über den an der Kaufläche auftretenden Materialverlust gibt es verschiedenste Veröffentlichungen und ebenso unterschiedliche Maße für den Verschleiß.

Das Ziel der durchgeführten Arbeit bestand darin, ein Verfahren zu entwickeln, das es ermöglichte, die in-vivo-Abrasion des klinisch untersuchten Kunststoffes ISO-V(R) durch die Auswertung erzeugter Moiré-Bilder an Gipsreplikas der gelegten Füllungen zu quantifizieren.

Es erscheint zweckmäßig, zunächst den Begriff "Abrasion" einzuordnen: Die DIN-Vorschrift 50320 von 1976 definiert den Verschleiß als "Vorgang eines fortschreitenden Materialverlustes aus der Oberflächenschicht eines festen Körpers, infolge tribologischer Beanspruchungen".

Nach dem heutigen Stand der technischen Erkenntnisse unterscheidet man bei einem tribologischen System vier verschiedene Verschleißmechanismen: Die Adhäsion, die Abrasion, die Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktionen. Das tribologische System besteht dabei aus einem Grundkörper (Festkörper), einem Gegenkörper (Festkörper), einem Zwischenstoff (Flüssigkeit) und einem Umgebungsmedium (Gas). Die Abrasion wird demnach als eine bestimmte Form des Verschleißes gesehen, der Verschleiß als Teilbereich der Tribologie. Die Tribologie wiederum beschäftigt sich mit Reibung, Verschleiß und Schmierung.

Aus den neuzeitlichen Auffassungen der Tribologie geht hervor, daß das Verschleißverhalten eines Werkstoffes n u r für die vorhandenen Beanspruchungsverhältnisse Gültigkeit besitzt (WEBER 1980a).

Das entwickelte Meßverfahren wählt als Maß für den Substanzverlust den größten Abstand zwischen zwei Profilkurven, die den Oberflächenverlauf an der Stelle des größten angenommenen Verschleißes darstellen (Erläuterungen, S. 60).

2. LITERATURÜBERSICHT

2.1. Darstellung von Oberflächen in zweidimensionalen Abbildungen

Karotgraphische Methoden, wie sie z.B. in der Geodäsie üblich sind, verschlüsseln die dritte Dimension des Raumes in eine zweidimensionale Abbildung mittels Isohypsen. Diese Kurven setzen sich aus Punkten zusammen, die jeweils die gleiche Höhenkoordinate besitzen.

Neben dem plastischen Effekt einer solchen Darstellung, der einem die räumliche Vorstellung der Oberfläche erleichtert, kann durch eine geeignete Zuordnung der Isohypsen in ein Koordinatensystem jede beliebige Raumrichtung in Schnittbildern dargestellt werden.

In der Geodäsie hat die Photogrammetrie zur Auswertung von stereoskopischen Bildern große Bedeutung. Ein Stereokomparator liefert hier sehr genaue Höhenlinienkarten (LACMANN 1950; SCHWIDEFSKY 1950; VIERLING 1965).

Auf dem zahnmedizinischen Sektor sind allerdings nur Verfahren interessant, die eine Darstellung kleiner Objekte ermöglichen. EBERT (1967) sowie STEINHILBER (1970) weichen von der photogrammetrischen Methode ab und erreichen durch die stereoskopische Vermessung der Objekte selbst größere Genauigkeit. Isohypsenbilder mit einer Äquidistanz von 250 Mikrometer benutzte STEINHILBER zur kartographischen Darstellung menschlicher Zahnreihen.

Mit Interferenzmikroskopen lassen sich nach dem Prinzip der Newton-Ringe Höhenunterschiede im Bereich der Lichtwellenlänge messen. Dieses Verfahren ermöglicht allerdings keine starke Variation der Äquidistanz der Linien und wird bei zahnärztlichen Objekten uninteressant.

Mit Laser-Strahlen lassen sich holographische Aufnahmen von Objekten herstellen; es entsteht ein räumlicher Eindruck beim Betrachter. LENK (1969) erreicht durch eine Variation des Verfahrens Höhenliniendarstellung.

BROOKS und HEFLINGER (1969) sowie TSURUTA und ITOH (1969) erzeugen auf der Objektoberfläche Interferenzstreifen mit zwei Laser-Strahlen und fotografieren diese.

Eine Methode, die man nur auf Außenflächen anwenden kann, ist das Lichtschnittverfahren. LACMANN (1950) projiziert ein streifenförmiges Gitter auf das Objekt derart, daß Punkte gleicher Höhe durch helle Lichtbänder miteinander verbunden sind.

Von TAKASAKI (1970) wird der Moiré-Effekt benutzt, um ein Objekt direkt mit Höhenschichtlinien zu überziehen und zu fotografieren (nähere Beschreibung des Verfahrens bei 3.2.).

2.2. Anwendung der Moiré-Topographie in der Medizin

Die von TAKASAKI (1970) entwickelte Methode, die er selbst Moiré-Topographie nennt, läßt sich wegen ihrer relativ einfachen Anordnung auch an lebenden Objekten anwenden.

Er zeigt dieses an Moiré-Aufnahmen von menschlichen Gesichtern und Rückenteilen, anhand derer man Asymmetrien der Oberflächenformen erkennen kann.

KECK et al. (1976) berichten über die Herstellung von Gewebeausgleichsfiltern aus Moiré-Topogrammen, die bei der Mantelfeldtechnik zur Strahlentherapie des M. Hodgkin gebraucht werden.

Ein Podometer, welches das Fußgewölbe im Topogramm festhält, konstruierten WINDISCHBAUER et al. (1976). Es findet in der Orthopädie Anwendung, indem krankhafte Fußstellungen doku-

mentiert werden. Im gleichen Institut der Veterinärmedizinischen Universitätsklinik Wien wurde auch ein Verfahren zur Darstellung und Vermessung von Zahnoberflächen erarbeitet, allerdings nur für artvergleichende Zahnuntersuchungen (HOLLER et al. 1978).

TETZLAFF (1978) untersuchte die Anwendungsmöglichkeit der Moiré-Topographie zur qualitativen Analyse zahnärztlicher Modelle und Werkstoffe. Er zeigt ferner Möglichkeiten auf, wie man Moiré-Bilder auch quantitativ analysieren könnte.

2.3. Methoden zur quantitativen Bestimmung des Substanzverlustes von Zahnfüllungen in vivo

Alle angeführten Methoden stehen vor der Schwierigkeit, auf indirekte Messungen (Replikas oder Prothesenzähne) zurückgreifen zu müssen. Es gibt noch keine Möglichkeit, direkte Messungen in der Mundhöhle durchzuführen.

JÖRGENSEN und ASMUSSEN (1978) legten Füllungen an Prämolaren und Molaren von Totalprothesen und hatten so Zugang zur direkten Messung. Die Ergebnisse lagen jedoch deutlich unter den Verschleißwerten anderer Verfahren.

DENNISON et al. (1980) lieferten nur unklare Resultate mit einer Methode, die den Substanzverlust dreidimensional erfaßt, indem der Hohlraum zwischen einem Metallnegativ der definitiv ausgearbeiteten Okklusalfüllung und den zu einem späteren Zeitpunkt genommenen Replikas der in vivo abradierten Füllungsoberfläche ausgegossen wird.

Sehr ähnliche Verfahren wandten auch HANDELMANN und PAMEIJER (1978) und VON GROENINGEN und ARENDS (1982) an.

WEBER (1980b) arbeitete ebenfalls mit Replikas. Die zeitlich gestaffelt hergestellten Gipsmodelle wurden mit buccalen und palatinalen (bzw. lingualen) Markierungen versehen.

Diese legten eine Ebene fest, durch die ein Frontalschnitt definiert wurde. Die Schnitte wurden fotografiert und vergrößert, die Markierungen durch eine Linie verbunden und die Fläche okklusal, d.h. oberhalb dieser Linie, bestimmt. Die zu verschiedenen Zeitpunkten gewonnenen Flächeninhalte wurden zueinander in Bezug gesetzt und aus deren Abnahme das Maß für die stattgefundene Abrasion ermittelt.

POTTS et al. (1976/78) arbeiteten an Gipsmodellen mit einem 3-Achsen-Mikrometer; ihre Ergebnisse haben eine Unsicherheit von 15 µm.

JÖRGENSEN et al. (1979) erreichten an Gipsmodellen mit Hilfe der Stereoskopie eine ähnliche Genauigkeit (10 - 15 µm).

METTLER et al. (1978) entwickelten ein Auswertungssystem, dessen Kernstück eine Dreikoordinatenmeßmaschine mit berührungsfreiem vertikalem Meßmikroskop ist. Hier wurde ein Meßfehler von 15 µm angegeben.

MEIER (1977) sowie MEIER und LUTZ (1978/79/80) ermittelten Verschleißwerte mit einem Tastschnittverfahren. Kupfermodelle der zu untersuchenden Oberflächen wurden mit einem Oberflächenrauhheits-Abtastgerät (Talysurf) untersucht, welches - auf einem X-Y-Schreiber montiert - in der Vertikalen eine 175-fach und in der Transversalen eine 20-fach vergrößerte Aufzeichnung erlaubte. Der Meßfehler wird hierbei mit 6,5 µm angegeben.

3. VERSCHLEISSFESTIGKEITSMESSUNG MITTELS MOIRÉ-TOPOGRAPHIE

3.1. Moiré-Topographie

Bei der Moiré-Topographie werden Objekte mit Höhenschichtlinien überzogen und fotografisch registriert. Aus den Darstellungen werden Maßzahlen ermittelt und rechnerisch ausgewertet.

3.2. Der Moiré-Effekt

Bei der Überlagerung von ähnlichen periodischen Mustern entsteht ein neues Muster. Es wird "Moiré" genannt.

Ein zu Meßzwecken geeignetes Muster ist ein Liniengitter. Auf einer ebenen Fläche sind parallele lichtdurchlässige und lichtundurchlässige Streifen gleichförmig angeordnet. Diese Anordnung ist periodisch, so daß sich immer ein lichtdurchlässiger und ein lichtundurchlässiger Streifen gleicher Breite abwechseln.

Wenn man mit einem feinen Gitter arbeitet und dieses aus einiger Entfernung betrachtet, so besitzt es einen bestimmten Grauwert. Legt man zwei identische Gitter übereinander (Gitterstreifen parallel zueinander), variiert der Grauwert des neuen Moiré-Musters zwischen völlig schwarz und dem Grauwert des Einzelgitters, entsprechend der jeweiligen Phasenverschiebung der Gitter in der Überlagerungszone (Abb. 19).

Ein Moiré-Bild, das durch Überlagerung zweier Gitter mit ungleicher Gitterkonstante entsteht, setzt sich aus allen o.g. Grauwerten zusammen. Dabei treten die dunkelsten und hellsten Zonen als M o i r é - L i n i e n hervor (Abb. 20).

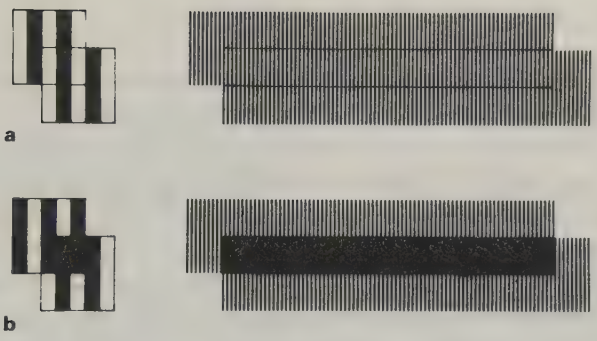


Abb. 19: Auswirkung der Phasenlage zweier identischer Strichgitter zueinander bei Überlagerung:
a) Zwei überlagerte Strichgitter mit gleichen Gitterkonstanten haben eine solche Phasenlage zueinander, daß ihre Gitterstriche genau zur Dekkung kommen. Daraus resultiert maximale Helligkeit in der Überlagerungszone.
b) Maximal mögliche Dunkelheit ergibt sich durch eine Phasenlage, bei der die lichtdurchlässigen Streifen des einen Gitters über den lichtundurchlässigen Streifen des anderen liegen.

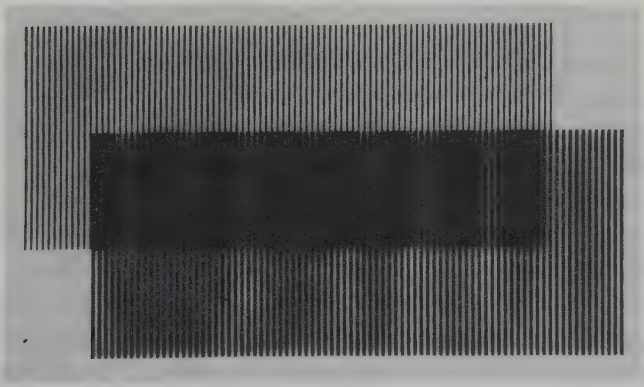


Abb. 20: Moiré-Streifen bei Überlagerung zweier Strichgitter mit unterschiedlicher Gitterkonstanten

3.3. Moiré-Topographie nach Takasaki

Wird ein Gitter mit Hilfe einer Lichtquelle auf ein Objekt projiziert (Abb. 21), so entsteht auf dessen Oberfläche ein gitterartiges Muster, dessen lokale Gitterkonstante und Phasenlage durch die Oberflächenstruktur des Objekts bestimmt wird. Betrachtet man dieses aufprojizierte Gitter durch das ursprüngliche Gitter, so entsteht ein Moiré-Bild, d.h. Moiré-Linien, deren Lage unabhängig von der Stellung des Gitters innerhalb der Gitterebene ist (Abb. 22). Die Moiré-Linien sind deshalb invariant gegen Bewegungen des Gitters in der Gitterebene während der Beobachtung. Schaut der Beobachter senkrecht durch das Gitter auf das Objekt und befindet er sich im gleichen Abstand zum Objekt wie die Lichtquelle, dann ist die Lage der Moiré-Linien in einfacher Weise nur durch die Oberflächenstruktur des Objekts gegeben (TAKASAKI 1970).

Wegen des endlichen Abstandes Lichtquelle -Gitter ist die Projektion des Gitters auf das Objekt eine Zentralprojektion mit der Folge, daß die Gitterkonstante des projizierten Git-

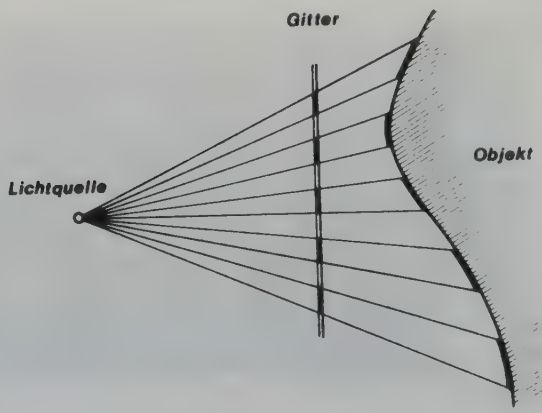


Abb. 21: Schematische Darstellung der Verhältnisse Gitter und Gitterschatten bei Beleuchtung einer Objektoberfläche durch ein Liniengitter.

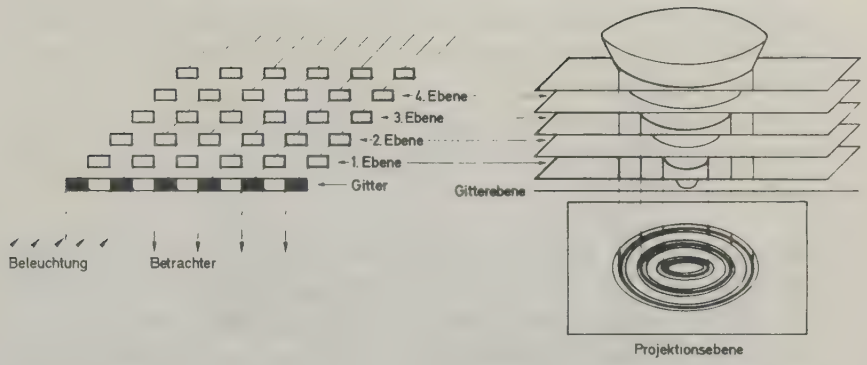


Abb. 22: Vereinfachte Erklärung der Entstehung von Moiré-Streifen auf einem Objekt:
Zu jeder Ebene, die parallel zum Gitter liegt, gehört eine ganz bestimmte Phasenverschiebung des projizierten Gitters. Bei Überlagerung des Gitterschattens mit dem Original ergeben sich verschiedene Helligkeitswerte von maximal möglicher Dunkelheit bei halber Phasenverschiebung bis maximaler Helligkeit bei ganzer Phasenverschiebung. Alle Punkte des Objekts, die in der Ebene mit halber Phasenverschiebung liegen, ergeben die dunklen Moiré-Streifen.

ters gegenüber der des ursprünglichen Gitters verändert ist. Andererseits führt der endliche Abstand Beobachter - Objekt dazu, daß die beiden Gitter wegen ihres unterschiedlichen Abstandes zum Beobachter mit unterschiedlichem Abbildungsmaßstab gesehen werden. Die daraus resultierende Verzeichnung führt in beiden Fällen selbst dann zu Moiré-Linien, wenn ein planes Objekt parallel zum Gitter eingesetzt ist; also an und für sich kein Anlaß für Höhenlinien gegeben wäre. Ist der Abstand Lichtquelle - Gitter aber gleich dem Abstand Beobachter - Gitter, so kompensieren sich beide Verzeichnungen.

Eine konsequente mathematische Abhandlung von TAKASAKI (1970) zeigt, daß jede Moiré-Linie jeweils alle Punkte im der Ob-

jektoberfläche verbindet, die vom ursprünglichen Gitter gleichweit entfernt sind; zwei aufeinanderfolgende Linien zeigen einen Höhenunterschied von $\Delta h = g \cdot \cot\rho$ an und bei $\rho = 45^{\circ}$ i.e. $\cot\rho = 1$ gilt: $\Delta h = g$.
(Δh = Höhenunterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Moiré-Streifen, g = Gitterkonstante, ρ = Einfallswinkel des Lichtes)

Die Höhendifferenz von Punkten auf benachbarten Moiré-Linien ist also bei vorgegebener Beleuchtungseinrichtung nur durch die verwendete Gitterkonstante gegeben, und es bietet sich an, diese Gitterkonstante möglichst klein zu wählen, um mit hoher Empfindlichkeit die Höhendifferenzen messen zu können.

Aus folgenden Gründen kann jedoch die Gitterkonstante nicht beliebig klein gewählt werden:

1. Der auf das Objekt aufprojizierte Gitterschatten muß möglichst scharf sein, damit kontrastreiche und entsprechend gut auswertbare Moiré-Linien entstehen. Dies wird dadurch erreicht, daß die Beleuchtungsapertur α - das ist der Winkel, unter dem vom Gitter aus gesehen die Lichtquelle erscheint - ausreichend klein ist. Will man den Tiefenbereich hinter dem Gitter bis zum Abstand t ausmessen, kann bei vorgegebener Apertur α die Gitterkonstante bis etwa $g \geq 6 \cdot t \cdot \alpha$ ($\approx$ 120 µm) gewählt werden (Abb. 23 + 24).
   Dieser Überlegung liegt die willkürliche Annahme zugrunde, daß der Gitterschatten noch ausreichend Kontrast aufweist, wenn der Kernschatten $\geq 2/3$ von $g/2$ ist. (Die mathematische Abhandlung des Problems vermittelt der Anhang, S. 88).
   Zwar läßt sich die Beleuchtungsapertur α durch eine geeignete optische Abbildung der Lichtquelle mittels entsprechender Linsen und Blenden sehr klein machen, doch ist prinzipiell die Grenze der Gitterkonstanten dadurch gegeben, daß selbst bei Apertur Null durch Beugung des Lichtes der Wellenlänge λ an dem Gitter um den Winkel

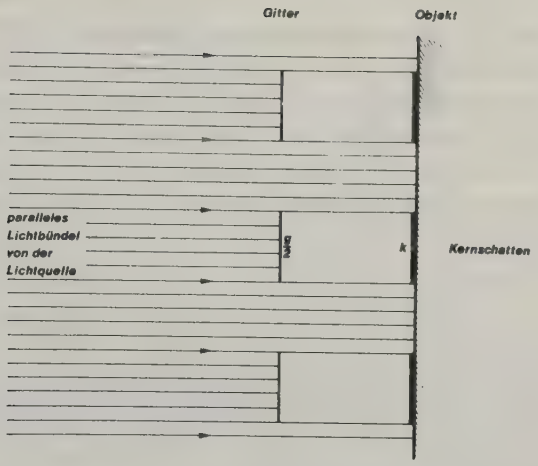


Abb. 23: Idealfall des größtmöglichen Kontrastes, Beleuchtungsanordnung mit Apertur Null

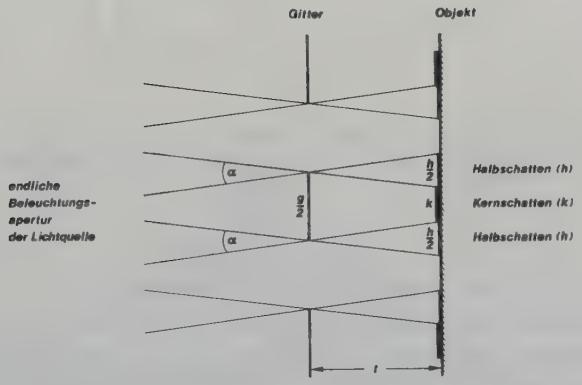


Abb. 24: Verschlechterung des Kontrastes, bei einer Beleuchtung mit endlicher Beleuchtungsapertur α

$\alpha_b = \frac{\lambda}{g}$ (1. Beugungsordnung) der Schatten des Gitters unscharf wird: Gebeugtes Licht trifft in den Kernschattenbereich hinter dem Gittersteg und hellt ihn auf (Abb. 25). Eine einfache Abschätzung (Anhang, S. 88) zeigt, daß bei einem auszuwertenden Tiefenbereich l des Objektes die Gitterkonstante $g \geq \sqrt{12 \cdot l \cdot \lambda}$ sein muß, damit dieser Effekt nicht stört. Für eine mittlere Lichtwellenlänge λ = 0,5 µm und einem Tiefenbereich l = 3 mm ergibt sich deshalb eine kleinste sinnvolle Gitterkonstante von etwa 130 µm.

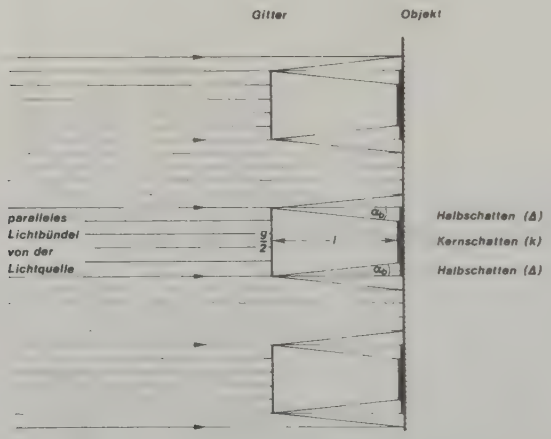


Abb. 25: Verschlechterung des Kontrastes trotz Apertur Null wegen Beugung des Lichtes an den Gitterstegen

2. Das Licht des aufprojizierten Gitters wird von der Objektoberfläche diffus reflektiert. Bildet man die Objektoberfläche mit einer Optik ab, die einen Winkelbereich ß erfaßt (Abbildungsapertur), so erhält man im Bild nur dann Moiré-Linien, wenn sowohl das ursprüngliche Gitter als auch das auf das Objekt im Abstand t aufprojizierte Gitter scharf in dieses Bild abgebildet wird. Dies kann

durch Vorgabe einer hinreichend kleinen Abbildungsapertur β erreicht werden.
Doch läßt sich die Abbildungsapertur nicht beliebig klein wählen: Nach den Gesetzen der Optik wird nur dann ein Gitter im Bild wiedergegeben, wenn $\beta \geq \alpha_b$ (Beugungswinkel dieses Gitters) ist. Im Grenzfall $\beta = \alpha_b$ ergeben sich dieselben kleinsten Werte für die Gitterkonstante g wie unter 1.

3.4. Aufbau der Meßapparatur

Entsprechend dieser grundsätzlichen Überlegungen ist die Meßapparatur aufgebaut (Abb. 26).

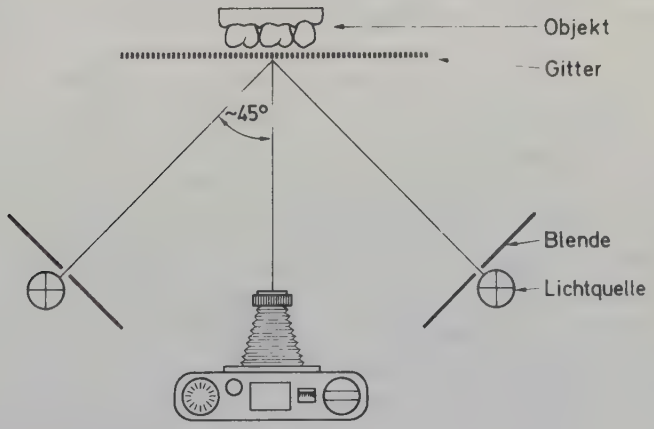


Abb. 26: Apparatur zur Erzeugung der Moiré-Bilder auf einer Zahnoberfläche

3.4.1. Beleuchtung

Zur Beleuchtung des Gitters wird wahlweise einer der beiden Diaprojektoren vom Typ PRADO, Objektiv Typ Hektor, 1 : 2,5/ 150 mm (Anhang, S. 86), als Lichtquelle benutzt, in dessen Diaschacht zur Beschränkung der Beleuchtungsapertur in Richtung parallel zu den Gitterstrichen eine Schlitzblende der Breite 1 mm eingesetzt ist. Diese Blende wird in 70 m Entfernung mit einer Breite von 46 cm abgebildet (willkürliche Einstellung der Objektive). Man erhält auf diese Weise eine Beleuchtungsapertur von 6,6 mrad.

Der große Abstand dieser Lichtquelle zur Meßanordnung Gitter - Objekt bewirkt nahezu eine Parallelprojektion des Gitters auf das Objekt, so daß Fehler in der Messung vernachlässigt werden können, die durch eine eventuelle zentralprojektive Verzeichnung des aufprojizierten Gitters entstehen können. Durch wahlweise Benutzung der beiden Diaprojektoren als Lichtquelle können Abschattungen im interessierenden Objektbereich vermieden werden.

3.4.2. Gitter

Das Gitter ist ein Strichgitter mit der Periode 133 µm, das durch siebenfache lichtoptische Verkleinerung einer Linienraster-Vorlage (Anhang, S. 85) hergestellt wurde. Es ist auf einem Mikroskop-Objektträgerglas fixiert und durch Eingießen in Kunstharz (Anhang, S. 84) gegen Beschädigung geschützt. Die nutzbare Gitterfläche beträgt 2 x 3 cm (Abb. 27).

Die Genauigkeit der Gitterperiode und die Regelmäßigkeit über die gesamte Fläche wurde mit einem Universal-Meßmikroskop (Anhang, S. 87) überprüft. Dieses Gitter ist auf einem Präzisionsschlitten montiert, der eine Verschiebung des Gitters in der Gitterebene ermöglicht, ohne den Abstand des Gitters vom Objekt in störender Weise zu verändern. Da die

Lage der Moiré-Linien unabhängig von der Lage des Gitters innerhalb der Gitterebene ist, kann das Gitter während der Aufnahme mit diesem Präzisionsschlitten hin und her bewegt werden, um die Gitterstriche zu verwischen. Lage und Kontrast der Moiré-Linien verändern sich dadurch nicht.

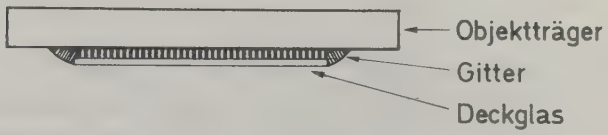


Abb. 27: Verwendetes Gitter, eigene Herstellung

3.4.3. Kamera und fotografisches Material

Zur Abbildung des Objektes und der Moiré-Linien diente eine Kamera vom Typ Miranda (Anhang, S. 86) mit dem Objektiv Novoflex Macro 105 (Anhang, S. 86) auf einem Balgengerät. Die Abbildungsapertur kann durch die Blendenöffnungen 4 bis 22 eingestellt werden. Nach ausgedehnten Vorversuchen erwies sich folgendes fotografisches Vorgehen als besonders günstig, um kontrastreiche Moiré-Bilder zu erhalten:

- Aufnahmematerial Agfa-Ortho 25 (Anhang, S. 84), hart arbeitend
- Belichtungszeit 30 Sekunden
- Blende 22
- Entwicklungszeit 2 Minuten
- Entwicklerlösung Dokumol (Anhang, S. 85)

3.5. Vorbereitung der Modelle zur Fotografie

Um ein identisches Reponieren der Modelle in die optische Einrichtung zu ermöglichen, wurde ein Verfahren gewählt, das sich an Referenzpunkten orientiert. Zur Festlegung einer Referenzebene, die parallel zur Gitterebene liegt, wurde auf nichttragenden Höckerspitzen des zu untersuchenden und eines Nachbarzahnes eine plane Glasplatte aufgelegt und diese mit Kunststoff und Gips fixiert (Abb. 28).

Die auf diese Weise auf dem Erstmodell hergestellte Verschlüsselung mußte mit den nachfolgenden Modellen paßgenau übereinstimmen. Kam es nicht zu dieser Übereinstimmung, wurde eine neue Bezugsebene festgelegt. Die Kontrolle über das Aufliegen der spiegelnden Glasplatte wurde mit Auge und 12,5 µm dicker Shimstock-Folie (Anhang, S. 87) überprüft. Die Glasplatte (≙ Bezugsebene) wurde auf eine ebenfalls plan geschliffene größere Glasplatte aufgebracht und mit Klebewachs fixiert.

Jedes Modell der Vergleichsserie wurde in den vorgegebenen Schlüssel eingesetzt und an einem Übertragungsrahmen befestigt, der plan auf der großen Glasplatte liegend das Modell umfaßte. Darüber hinaus war die identische Lage des Übertragungsrahmens für jedes Modell durch einen Anschlag an einer Ecke der großen Glasplatte gesichert (Abb. 29).

Zur Arretierung der Glasplatte diente ein Parallelometer (Anhang, S. 86), um eine möglichst exakte Fixierung während des Abbindevorganges der oben genannten Materialien zu gewährleisten.

Eine Führung mit Anschlag auf der optischen Bank gewährleistete die Aufnahme des Übertragungsrahmens mit Modell derart, daß die Referenzebene parallel zur Gitterebene justiert wurde und alle Modelle einer Vergleichsreihe in identischer Lage fotografiert werden konnten. Gitter und Rahmen waren parallel zur Filmebene eingestellt. Ein Feintrieb mit horizontaler und vertikaler Einstellungsmöglichkeit brachte den

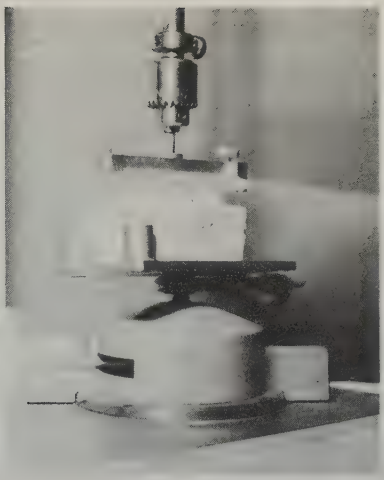


Abb. 28: Festlegung der Referenzebene mit aufgelegter Glasplatte

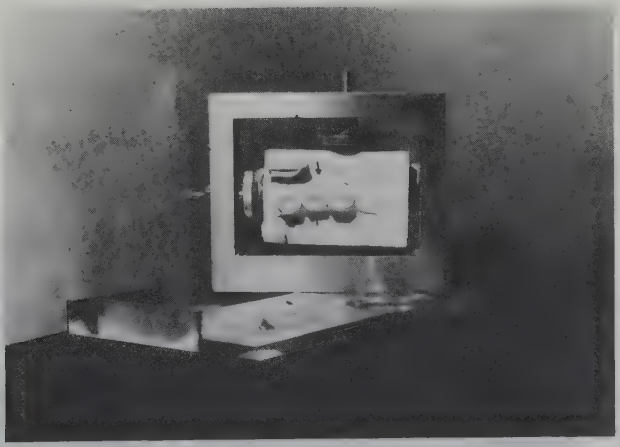


Abb. 29: Übertragungseinrichtung; mit Klebewachs fixiertes Modell im Rahmen

zu untersuchenden Zahn in die gewünschte Stellung zur optischen Achse der Kamera (Abb. 30/31).

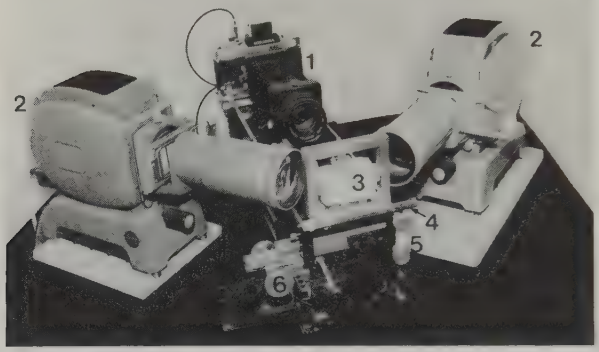


Abb. 30: Übersichtsaufnahme der Apparatur zur Erzeugung von Moirê-Bildern auf der Zahnoberfläche:
1) Kamera, 2) Lichtquelle, 3) Modell im Übertragungsrahmen, 4) Führung mit Anschlag, 5) Feintrieb mit Arretierungsteil zur Positionierung des Modells, 6) Feintrieb zur Bewegung des Gitters

Abb. 31: Detaíl-Ansicht: Gitter mit Halterung (Pfeil)

Nachdem der Zahn des Erstmodells in die Mitte der Abbildung gerückt wurde, erfolgte die Arretierung des Feintriebs, um einer Lageänderung des Rahmens beim Übertragen der nachfolgenden Modelle vorzubeugen (Abb. 30).

Die Genauigkeit des Übertragungsmodus wurde überprüft durch zehnmaliges Reponieren und Fotografieren desselben Modells. Zwischen diesen Aufnahmen konnte mit der später beschriebenen Auswertungsmethode kein Unterschied festgestellt werden.

3.6. Justierung und Eichung der Apparatur

Nachdem auf einem erschütterungsarmen Tisch Kamera und Beleuchtung in e i n e Ebene gebracht und auf ca. 45° zueinander eingestellt wurden, konnte das Gitter senkrecht zu dieser Ebene sorgfältig auf den Feintrieb montiert werden. Sämtliche wichtigen Parameter der Anlage wurden mit Hilfe von Kunststoff nach ihrer Justierung unveränderbar fixiert.

Zur Eichung dienten Prüfkörper aus Gips. Ihre Herstellung erfolgte nach dem gleichen Verfahren wie die zu untersuchenden Zahnmodelle. Die Originale waren fünf auf 1 µm genau vermessene Metallkugeln mit unterschiedlichem Durchmesser sowie ein speziell angefertigtes Werkstück, bei dem zwei parallele Ebenen durch eine schiefe Ebene (Winkel genau 45°) miteinander verbunden sind. Dabei besteht zwischen ihnen eine Höhendifferenz von exakt 2,500 mm. Ferner kam ein Gipskörper mit einer planen Oberfläche zur Anwendung. Die Vermessung der Prüfkörper wurde mit einem "Digital-Inkrementaler Längenzähler" (Anhang, S. 85), Auflösung 1 µm, vorgenommen.

Die auf den Kugeloberflächen erzeugten Moiré-Linien (Abb. 32) ermöglichten

a) eine genaue Aussage darüber, ob die Moiré-Linien in der von uns untersuchten Tiefenausdehnung echte Höhenlinien darstellen,

b) die Bestimmung Δh (Höhendifferenz zwischen den einzelnen Linien,
c) die Berechnung des Vergrößerungsmaßstabes Original - Diaprojektion,
d) eine statistische Auswertungsgenauigkeit durch Mehrfachmessung.

Mit der schiefen Ebene konnte ermittelt werden,

a) ob in dem zu untersuchenden Tiefenbereich die Moiré-Linien d e u t l i c h sichtbar waren,
b) ob diese den gleichen Abstand zueinander auf der ganzen Fläche beibehielten,
c) wie viele Linien pro mm Höhendifferenz auftraten.

Mit der planen Gipsoberfläche wurde der gesamte Tiefenbereich aufgesucht, in dem brauchbare Moiré-Linien entstehen.

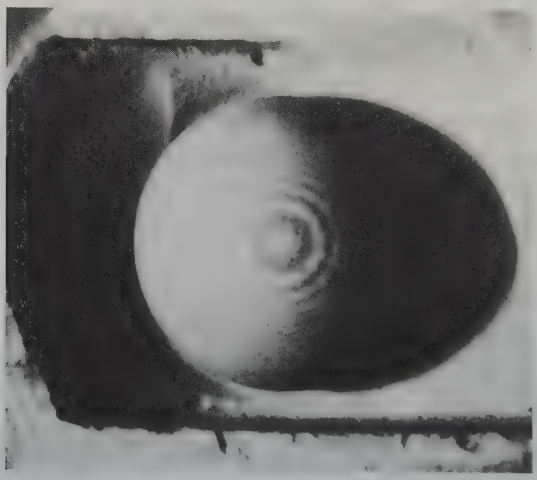


Abb. 32: Moiré-Fotografie einer Testkugel zur Eichung der Meßapparatur. Die Moiré-Linien sind konzentrische Kreise.

3.7. Durchführung der Moiré-Fotografie

Bei den Moiré-Aufnahmen nach TAKASAKI werden die beiden Lichtquellen zu einer Aufnahme g l e i c h z e i t i g benutzt, um das Objekt schattenfrei auszuleuchten. Die Moiré-Linien werden durch die Anordnung nicht verändert, wenn eine exakt symmetrische Anordnung der Lichtquellen um den Beobachtungspunkt gegeben ist.

Diese präzise Anordnung wurde bei unserem Verfahren nicht durchgeführt, weil eine Verifikation der genauen Position der Lichtquellen zur optischen Achse nicht möglich war. Die Modelle wurden abwechselnd mit Beleuchtung von links und von rechts bei bewegtem Gitter fotografiert und beim Auswerten die entsprechenden Höhendifferenzen der Moiré-Linien berücksichtigt: Lichtquelle links, $\Delta h = 59$ µm
Lichtquelle rechts, $\Delta h = 61$ µm

Die Beleuchtung von einer Seite erlaubt durch die nuancierten Grautöne der Abbildung eine rasche Orientierung über den Zustand des Oberflächenreliefs (Abb. 33, 34, 35).

Abb. 33: Pat. D.W., Zahn 27, Moiré-Bild einer do-Füllung unmittelbar nach Ausarbeitung und Politur; Beleuchtung von links

Abb. 34: Pat. B.S., Zahn 36
Status nach Legen einer mod-Füllung; Beleuchtung von rechts

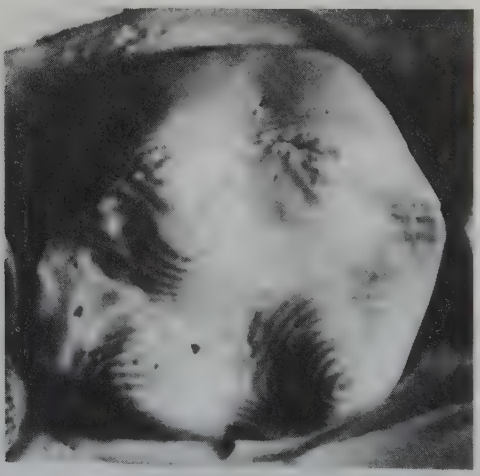


Abb. 35: Pat. B.S., Zahn 36
Status der mod-Füllung (vgl. Abb. 34) nach 1-jähriger Tragezeit; Beleuchtung von rechts

3.8. Auswertung der Aufnahmen

3.8.1. Apparatur

Die so gewonnenen Aufnahmen wurden zur Auswertung mit einem Diaprojektor, Typ Pradovit, Objektiv Colorplan CF 2,5/90 mm (Anhang, S. 86) vergrößert auf eine Zeichenfläche projiziert, wo der Verlauf der Moirê-Linien im interessierenden Oberflächenbereich und damit dessen Höhenstruktur ausgemessen werden konnte.

Da in den anstehenden Meßreihen verschiedene Abdrücke eines Zahnes miteinander verglichen werden sollten, um die zwischenzeitliche Abrasion festzustellen, wurde eine Anordnung aus zwei Diaprojektoren des gleichen Typs aufgebaut, mit der gleichzeitig die zwei zu vergleichenden Aufnahmen aufeinander projiziert werden konnten. Durch wechselseitiges Ein- und Ausschalten ließ sich eine unterschiedliche Lage der Moirê-Linien in den Aufnahmen qualitativ sehr schnell feststellen.

3.8.2. Justierung der Apparatur

Zur Verminderung von Verzeichnungsfehlern sind die beiden Diaprojektoren auf einer stabilen Grundplatte gegeneinander und zur Zeichenfläche so einjustiert, daß sich ihre optischen Achsen in der Mitte des Gesichtsfeldes in der Zeichenfläche schneiden und die Winkelhalbierende der optischen Achsen senkrecht auf der Zeichenfläche steht (Abb. 36).

Diese Justierung wurde mit Hilfe eines Justierlasers durchgeführt, dessen Strahl auf der Zeichenfläche an einem dazu aufgesetzten Spiegel in sich reflektiert wird. Die einjustierte Anordnung wurde unverrückbar in Kunststoff fixiert.

Da die Objektive der Projektoren nicht verzeichnungsfrei arbeiteten, war es für eine quantitative Auswertung wichtig, deren Verzeichnung festzustellen und eventuell die Meßergebnisse entsprechend zu korrigieren.

Zu diesem Zweck wurden geprüfte identische Testgitter auf die Zeichenfläche projiziert. Geschieht dies gleichzeitig mit beiden Projektoren, entstehen Moiré-Streifen, deren Verlauf einen ersten qualitativen Überblick über die Verzeichnung gibt.

Zusätzlich wurden die Testgitter einzeln projiziert und die Verzeichnung der Bilder gemessen (Fehlerdiskussion, S. 70).

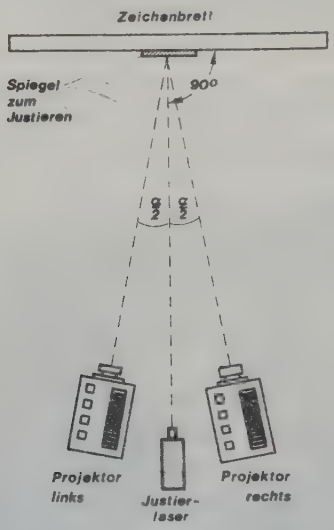


Abb. 36: Anordnung und Justierung der Apparatur zur Auswertung der Moiré-Bilder

3.8.3. Ermittlung der Maßzahlen (Koordinaten der Profilkurven)

3.8.3.1. Horizontale Deckung der zu vergleichenden Aufnahmen

Die beiden zu vergleichenden Aufnahmen wurden auf das Zeichenbrett projiziert, Umriß des Zahnes und unveränderte Okklusalbereiche zur Deckung gebracht. Zur Orientierung wurde zunächst an dem in die Zeichenebene projizierten Bild des Erstmodells Umriß, Strukturdetails und in unverändert angenommenen Oberflächenarealen das Moiré-Linienmuster mit einem feinen Bleistift nachgefahren. Das Zweitmodell gelangte so zur Projektion, daß Umriß und Moiré-Linienmuster mit dem Aufgezeichneten für das Auge deckungsgleich waren.

Der Diaprojektor konnte zu diesem Zweck horizontal, vertikal und um die optische Achse durch Schrauben verstellt werden. Gelangten die beiden Bilder nicht genau zur Deckung, machte sich dies beim alternierenden Ein- und Ausblenden der beiden Projektoren durch "Bewegung" der Moiré-Linien bemerkbar. Bei Deckungsgleichheit "steht" das Moiré-Bild in den unverändert gebliebenen Flächen.

3.8.3.2. Auffinden von größten Verschleißbereichen

Die Lage der okklusalen Stops, die nach Füllungslegung notiert worden war, diente nun zum Auffinden von Bereichen mit maximalem Substanzverlust.

Die qualitative Eingrenzung erfolgte visuell durch die Beurteilung der Abstände der Moiré-Linien mit gleicher Ordnungszahl. Beurteilungskriterium für die quantitative Erfassung des Verschleißes einer Füllung war der in Bereichen der zentrischen Kontakte senkrecht zur Oberfläche gemessene Höhenverlust. Er wurde durch Überlagerung zweier Profilkurven der zu vergleichenden Oberflächenreliefs ermittelt.

3.8.4. Darstellung der Profilkurven und Errechnung der Maxima

Die vorhandene Meßeinrichtung ermöglicht eine Moiré-Topographie, bei der die Moiré-Streifen Höhenlinien darstellen. Sie überziehen eine Oberfläche in periodischen 118 µm-Schritten (Beleuchtung von links) bzw. 122 µm-Schritten (Beleuchtung von rechts). Da die hellen und dunklen Streifen des Gitters gleich breit sind, kann man sogar 59 µm- bzw. 61 µm-Schritte unterteilen.

Die Punkte einer Profilkurve werden in ein Koordinatensystem folgendermaßen übertragen:
Die x-Werte liegen auf einer Geraden, die von der Höckerspitze durch den Kontaktpunktbereich (= Verschleißbereich) in die zentrale Grube geht (Abb. 40 + 41). Die x-Werte wurden nach Festlegung von Hilfspunkten ermittelt. Die Hilfspunkte entsprechen den Übergängen der hellen zu den dunklen Linien bzw. umgekehrt und wurden gewählt, da hier der Kontrast am stärksten und die Ablesegenauigkeit am größten ist. Zu den x-Werten gelangt man durch die jeweilige Mittelung der Abstände von Hilfspunkt zu Hilfspunkt.

Die dazugehörigen y-Werte sind durch die entsprechende Ordnungszahl der Moiré-Linien gegeben: Jeder Wert ist vom nächsten 59 µm bzw. 61 µm entfernt.

Die Kurven wurden so durch n ($10 \leq n \leq 30$) Koordinatenpaare dargestellt und als Polygonzug gezeichnet (Plotterzeichnung nach Errechnung der Kurven durch den Computer). Die Zwischenpunkte der Kurven bzw. die Tangentensteigung (t) wurden dabei durch kubische SPLINE-Interpolation unter Verwendung einer Programmroutine aus IMSL (= International Mathematical and Statistical Libraries, Inc.) bestimmt (Abb. 38, 39, 42 + 43).

Zur Bestimmung des Substanzverlustes bei einer Füllung wird der Profilkurve der Ursprungsfüllung (K_1) die Profilkurve der Testfüllung (K_2) überlagert (Abb. 37, 38, 39, 42 + 43). Dabei haben beide Kurven den ersten Punkt gemeinsam (hier noch keine meßbare Höhendifferenz).

Der Verschleiß wird nun definiert als Abstand P_{K1} zu P_{K2} (≙ H max.), wobei in jedem Punkt P_{K1} von K1 die Senkrechte auf der Tangenten (t) in P_{K1} mit K2 geschnitten wird (Abb. 37, 39+43). Die Richtung des Verschleißes in einem Kontaktpunktbereich wurde so als senkrecht zur Oberfläche angenommen.

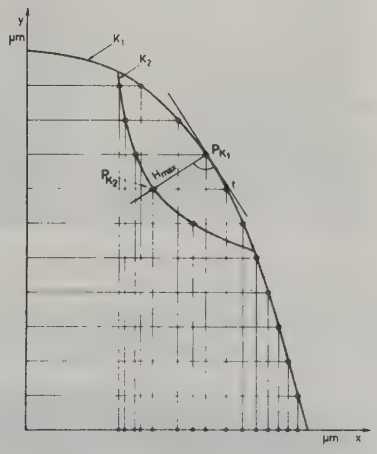


Abb. 37: Schematische Darstellung der Überlagerung zweier Profilkurven zur Ermittlung des Verschleißmaximums

Durch jeden Verschleißbereich werden drei Profilkurven gezogen; damit wird hier der größte Substanzverlust hinreichend genau eingegrenzt (Abb. 40 + 41). Ein Okklusalrelief wurde dabei durch maximal 9 Profilkurven charakterisiert.

Als Verschleißmaximum je Füllung wurde der größte H_{max}-Wert ihrer Profilkurven angenommen (Abb. 37, 39).

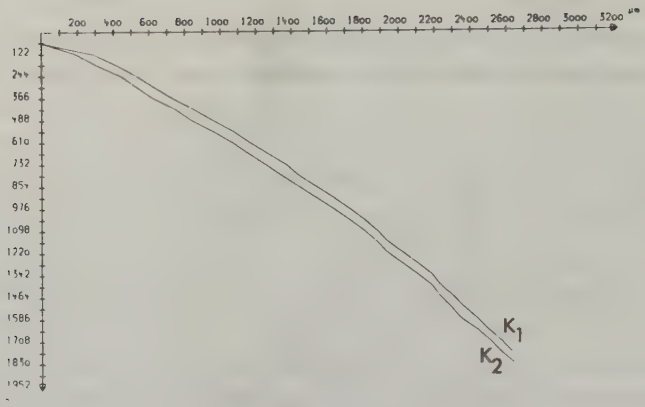


Abb. 38: Pat. R.J., Zahn 36
Plotterzeichnung zweier Profilkurven nach vorausgegangener Koordinatenberechnung und Überlagerung

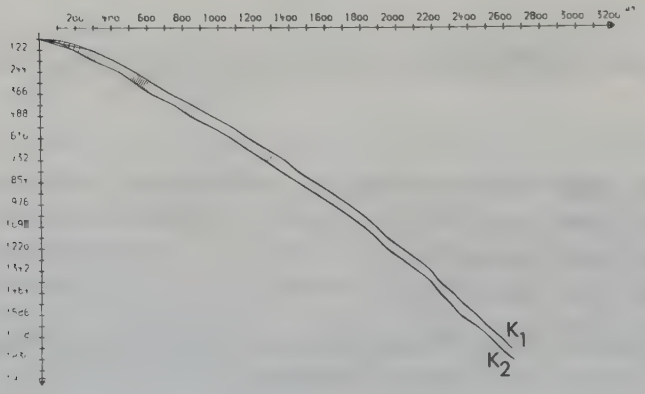


Abb. 39: Pat. R.J., Zahn 36
Plotterzeichnung der überlagerten Profilkurven mit Darstellung der möglichen Maxima

Abb. 40: Pat. W.A., mod-Füllung bei Zahn 46
Moirê-Fotografie des Erstmodells mit eingezeichneten Geraden zur Ermittlung dreier Profilkurven in einem Verschleißbereich

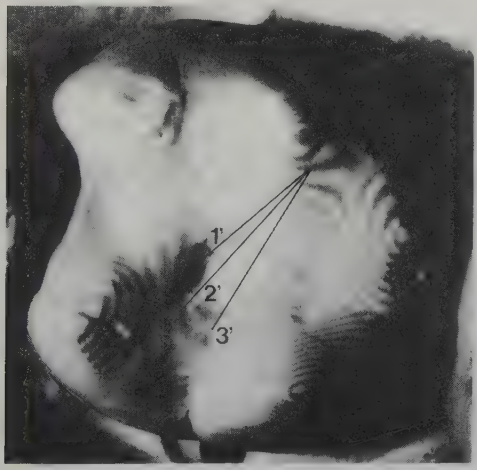


Abb. 41: Pat. W.A., mod-Füllung bei Zahn 46
Moirê-Fotografie derselben Füllungsoberfläche wie in Abb. 40 nach einjähriger Tragezeit. Die eingezeichneten Geraden sind dieselben und charakterisieten jene Profilkurven, die den Ursprungskurven überlagert werden

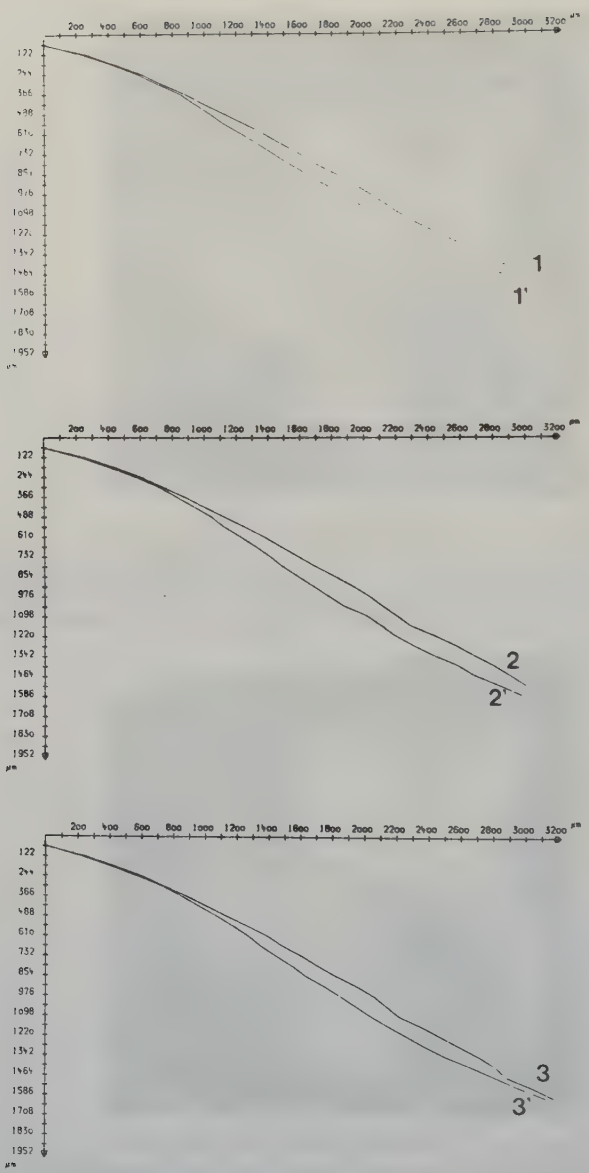


Abb. 42: Überlagerung der drei Profilkurvenpaare, deren Verlauf durch die Geraden in Abb. 40 + 41 festgelegt wurden. Plotterzeichnung nach vorausgegangener SPLINE-Interpolation

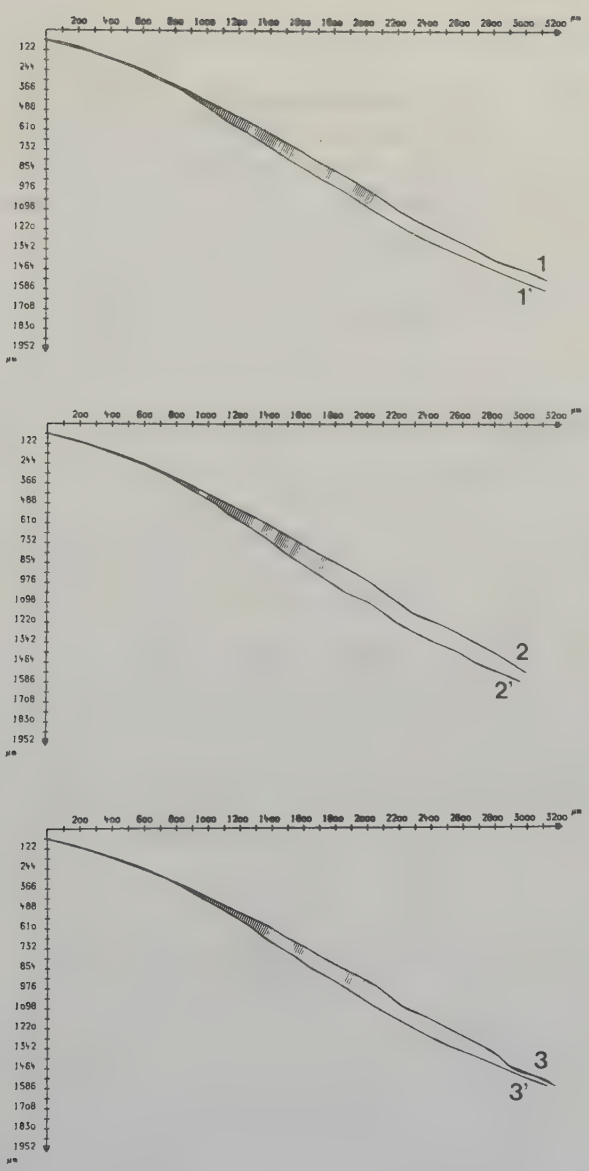


Abb. 43: Plotterzeichnung der Profilkurvenpaare aus Abb. 42 mit Darstellung der möglichen Maxima

4. ERGEBNISSE

Nach 1- und 2 1/2-jähriger Tragezeit wurde bei 5 bzw. 4 Füllungen die Verschleißfestigkeit mittels der Moiré-Topographie bestimmt. Der hohe Arbeitsaufwand und die oben erwähnten Anforderungen ließen eine Anzahl von 5 zu untersuchenden Füllungen als sinnvoll erscheinen.

Die Meßergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefaßt und in Abb. 44 graphisch dargestellt.

Tabelle 6: Kunststoff ISOMOLAR (ISO-V)$^{(R)}$, max. Verschleißwerte

Modell Nr.	1	2	3	4	5	Mittel
Zahnart	Molar	Prämolar	Prämolar	Molar	Molar	-
Füllg.art	mod	mod	mod	mod	mod	-
Anzahl Profil-kurven	6	3	4	6	9	-
Max.Werte in µm nach 1 Jahr	111±7	35±3	67±4	$50\pm^{6}_{4}$	$82\pm^{6}_{5}$	69±5
Max.Werte in µm nach 2 1/2 Jahren	-	$49\pm^{5}_{7}$	$82\pm^{7}_{9}$	$89\pm^{6}_{7}$	102±6	$80,5\pm^{6}_{7}$

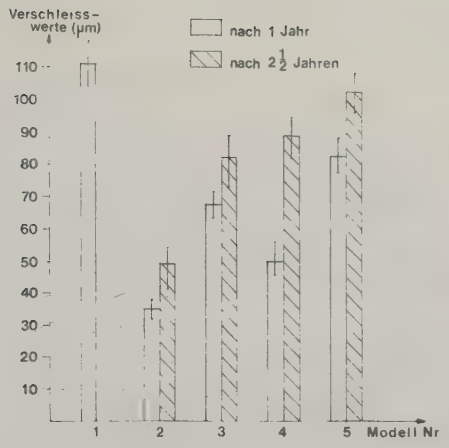


Abb. 44: Verschleißwerte nach 1 bzw. 2 1/2 Jahren

Gleichzeitig untersuchten MEINT (1983) und HAHN (1983) im Rahmen ihrer Dissertationen die Kunststoffe ESTIC MICROFILL (ESTIC-MF)(R) und UVIO-FILL(R) mit dem hier beschriebenen Verfahren. Ihre Ergebnisse sind den obigen gegenübergestellt und sollen eine vergleichende Diskussion ermöglichen (Tab. 7 + Abb. 45).

Tabelle 7: Max. Verschleißwerte nach 1 Jahr bei Kunststoffüllungen aus ESTIC-MF(R) und UVIO-FILL(R) (Werte in µm

Modell Nr.	1	2	3	4	5	Mittel
ESTIC-MR(R)	147±3	$126\pm^{6}_{7}$	$99\pm^{3}_{4}$	$122\pm^{5}_{6}$	99±10	$118,5\pm^{5}_{6}$
UVIO-FILL(R)	$125\pm^{4}_{5}$	$165\pm^{6}_{5}$	$53\pm^{5}_{6}$	90±5	133±6	113 ±5

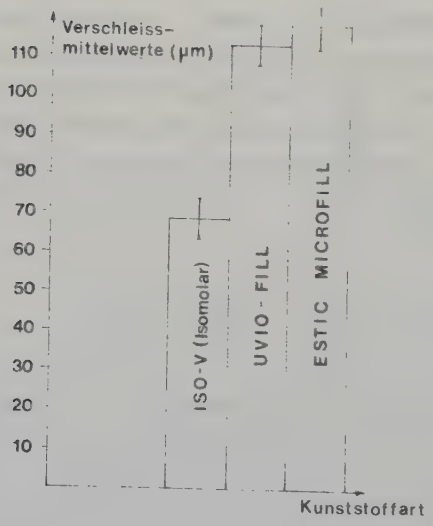


Abb. 45: Verschleißwerte nach 1 Jahr Tragezeit (Mittelwerte)

5. DISKUSSION

5.1. Diskussion der Ergebnisse

Die errechneten Maximalwerte für den Verschleiß an okklusionstragenden Füllungen aus den untersuchten Kunststoffen (ISO-V(R), ESTIC-MF(R), UVIO-FILL(R)) sind vor allem als Einzelergebnisse zu werten, da zum einen der Stichprobenumfang gering und zum anderen der Zeitraum der Beobachtung relativ kurz war.

Selbst ein großer Stichprobenumfang würde nur vorsichtige Aussagen ermöglichen. Viele Faktoren können das Einzelergebnis beeinflußt haben; die Problematik wird bei deren Auflistung deutlich (WEBER 1980a, b):

1. Die individuelle Verschiedenheit der einzelnen Menschen
2. Die Unmöglichkeit der Herstellung gleichstarker Kontaktpunkte an jedem Zahn
3. Die Meßtechnik

Die Individualität der Versuchspersonen kann sich sehr vielfältig zeigen und auswirken:

- Individueller Kaudruck
- Wechselnde Kraftrichtung durch Bewegung des Unterkiefers und durch Anatomie der Kauflächen
- Wechselnde Geschwindigkeit der Krafteinwirkung
- Wechselnde Gegenstoffe durch unterschiedliche Ernährung
- Wechselnde Häufigkeit der Belastung (beeinflußt durch psychische Faktoren)
- Temperaturveränderungen
- Chemische Einflüsse
- Biologie der Mundhöhle

Den Ausführungen von LUTZ (1980c) zufolge muß man bei Kompositerestorationen unmittelbar nach dem Ausarbeiten stets mit stärkeren Okklusionskontakten rechnen, als dieses bei Amalgam der Fall wäre. In den ersten 30 Tagen nach Legen der Füllung können demzufolge unterschiedlich große, zum Teil

extreme Substanzverluste auftreten. Bei der vorliegenden Untersuchung wurden die Erstmodelle gleich nach der Politur erstellt und die anfänglich unterschiedlich stark wirksame Attrition auf das Okklusalrelief außer acht gelassen, um unter praxisgerechten Bedingungen eine Aussage machen zu können.

Bei der Meßtechnik ist man folgenden Schwierigkeiten ausgesetzt:
- Lokalisation des Meßortes
- Markierung des Meßortes (Wiederauffinden von Referenzpunkten)
- Meßfehler bei der Übertragung

Die ermittelten Verschleißdaten der drei Kunststoffmaterialien (ISO-V(R), ESTIC-MF(R), UVIO-FILL(R)) wurden auf die Signifikanz ihrer Güteunterschiede untersucht.

Dabei wurde auf den U-Test nach WILCOXON, MANNY und WHITNEY zurückgegriffen, weil ein klassischer t-Test oder eine Varianzanalyse auf Grund der Inhomogenität der Varianzen nicht in Frage kam.

Mit einer Sicherheit von 95 % läßt sich ein signifikanter Unterschied zwischen ISO-V(R) und ESTIC-MF(R) sowie zwischen ISO-V(R) und UVIO-FILL(R) feststellen. Die Unterschiede zwischen ESTIC-MF(R) und UVIO-FILL(R) sind nicht signifikant.

5.2. Fehlerdiskussion

Folgende Fehlermöglichkeiten stehen bei dem angewandten Verfahren zur Diskussion:

a) Unterschied Original-Gipsmodell

Nach METTLER et al. (1978) und LUTZ (1980c) sind die Gipsreplikas nach der beschriebenen Herstellungsmethode hinreichend genau in unserem Meßbereich.

b) Reponiertechnik

Das identische Einbringen der zeitlich gestaffelt gewonnenen Gipsmodelle einer Füllung in die Meßapparatur wurde durch zehnmaliges Reponieren ein- und desselben Testmodells durch dieselbe Person auf mögliche Abweichungen untersucht (s. 3.4.). Eine mögliche Abweichung lag außerhalb der Meßgenauigkeit.

c) Gemeinsame Bezugsebene

Allen Messungen lag die Annahme zugrunde, daß auf der Zahnoberfläche unverändert gebliebene Schmelzareale vorhanden waren. Die Punkte der gewählten Referenzebene (s. 3.4.) lagen innerhalb dieser Areale. Bei der Überlagerung der Bilder mittels Diaprojektion auf dem Zeichenbrett kamen in diesen Bereichen die Moiré-Linien zur Deckung. Zähne, die diese Voraussetzung nicht erfüllten, kamen nicht zur Auswertung.

d) Abweichungen durch die verwendete Optik

- Verzeichnung durch die Objektive

  Ein definiertes Liniengitter wurde fotografiert und anschließend mit den Diaprojektoren auf das Zeichenbrett projiziert. Für jeden Projektor wurden 400 Rasterpunkte ausgemessen und die Verzeichnung, die bei der Überlagerung der Bilder b e i d e r Projektoren auftrat, ermittelt. In dem gewählten Arbeitsbereich lag die Verzerrung bei + 3 % linear (s. 3.5.).

- Abweichung der Moiré-Linien von idealen Höhenlinien

  Aufgrund der gewählten Anordnung Lichtquelle - Kamera, vor allem aber durch das Fehlen einer punktförmigen Lichtquelle, mußte eine Abweichung der Moiré-Linien von Isohypsen mit zunehmender Entfernung vom Gitter in Kauf genommen werden. Sie ist die Folge der perspektivischen Verzerrung des Gitterschattens mit zunehmender Entfernung von der Kamera. Die Abstände der Moiré-Linien werden mit zunehmen-

der Tiefe geringer und sind nicht mehr äquidistant. Mit einem Testobjekt (Schiefe Ebene, s. 3.5.) wurde die Abweichung für den maximalen Tiefenbereich unserer Messung ermittelt. Sie betrug -3 % linear.

Die Verzerrung durch die Objektive (+ 3 %) sowie diejenige durch die Perspektive (- 3 %) sind entgegengesetzt und heben sich auf dem Zeichenbrett in den untersuchten Meßarealen auf.

e) Bestimmung des Vergrößerungsmaßstabes

Fotografierte Testkugeln (s. 3.5.) verschiedener Radien brachten einen mittleren Vergrößerungsmaßstab von 41,6 ± 0,3. Diese Ungenauigkeit ist die Folge der perspektivischen Verzeichnung der Objekte bei der Fotografie: Kameranahe Bereiche wirken größer, kameraferne kleiner, als es der Realität entspricht. Bei der Fehlerrechnung wurden alle möglichen Vergrößerungsmaßstäbe durch ein Computerprogramm simuliert und ihr Einfluß auf die Verschleißmaxima berücksichtigt.

f) Ableseungenauigkeit

Beim Auswerten der Moirê-Bilder verursachte die Festlegung der Meßpunkte Schwierigkeiten, weil keine scharfen Übergänge zwischen hellen und dunklen Moiré-Streifen bestehen. Der unter 3.7.4. beschriebene Ablesemodus wurde stets von der gleichen Person durchgeführt. Beim mehrmaligen Festlegen und Ausmessen derselben Profilkurve auf dem Zeichenbrett streuten die einzelnen abgelesenen Werte um ± 0,25 mm. Das ergibt ± 6 µm auf der Originaloberfläche. Dieser Fehler wurde ebenfalls bei der Fehlersimulation berücksichtigt.

g) Eichfehler

Die Eichung der Äquidistanz der Moiré-Linien brachte Werte zwischen 116 und 120 µm bei der Beleuchtung von links und 120 bis 124 µm bei Beleuchtung von rechts. Diese Abweichungen gingen ebenfalls in die Fehlerrechnung ein.

Den Einfluß aller relevanten Fehler auf die Ergebnisse untersuchte ein Rechenprogramm, indem für jedes zu errechnende Maximum alle auftretenden Fehlerkombinationen simuliert wurden. Die Abweichungen sind jeweils für jeden Wert individuell und werden im Ergebnis aufgeführt.

Die in den Tabellen angegebenen Maximalwerte für den Verschleiß ergaben sich aus der Auswertung von mindestens je 3 bis maximal je 9 Profilkurven eines Okklusalreliefs. Zur Vollständigkeit der Fehlerdiskussion sei bemerkt, daß die gewählte Unsicherheit von ±10 Mikrometer als eine vernünftige obere Fehlerschranke angenommen werden kann. Bei allen 70 erstellten Profilkurven liegt die Abweichung unterhalb dieser Grenze.

5.3. Diskussion des Meßverfahrens

Die entwickelte Meßmethode ordnet sich in die Gruppe der indirekten Verfahren zur Bestimmung des okklusalen Substanzverlustes ein. Sie greift auf unbehandelte Gipsmodelle der zu untersuchenden Zähne samt Füllungen zurück. Eine fehlerfreie Herstellung solcher Replika ist Voraussetzung des Funktionierens der Messung.

Die Moiré-Topographie erlaubt eine rasche qualitative Übersicht der zu untersuchenden Okklusaloberfläche von Zahn und Füllung. Die Gebiete mit größter Oberflächenveränderung können mühelos dem Moiré-Bild entnommen werden und das Festlegen des Meßortes erfordert keinen großen Aufwand.

Durch abwechselnde Beleuchtung von links und rechts ist jedes Areal der Oberfläche erfaßt und auswertbar.

Der Auswertung entziehen sich nur sehr steile Abhänge und Stufen senkrecht zur Gitterebene. Solche Oberflächenformen kamen an den untersuchten Füllungen nicht vor.

Die größte Schwierigkeit besteht darin, die zu vergleichen-

den Moiré-Bilder in Deckung zu bringen. Ein noch so geringer Fehler bei der vorangegangenen Reposition in die optische Bank macht eine Bilddeckung unmöglich.

Genauso negativ wirkt sich eine Zahnwanderung oder gar eine Zahnrotation aus. Das Festlegen einer Referenzebene wird unmöglich. Die Annahme unveränderter Areale auf der Zahnoberfläche wurde schon unter 5.2. gefordert.

Reposition und Ermittlung der Profilkurven in den Abrasionszentren der Füllungen erfordern einen großen Arbeitsaufwand. Um die Fehlermöglichkeit gering zu halten, wurden die einzelnen Arbeitsabschnitte immer von ein- und derselben Person vorgenommen. Besonders die Befestigung der Modelle im Übertragungsrahmen und die Festlegung der Koordinaten der Profilkurven an den Übergängen der hellen und dunklen Moiré-Streifen stellen diese Anforderung.

Mit einer Unsicherheit der Höhenangabe von ±5-10 µm ist das Verfahren für die vorgenommenen Messungen hinreichend genau.

Ein Vergleich mit den Verfahren von METTLER et al. (1978) und MEIER und LUTZ (1980) bietet sich an, da auch hier Abstände von Meßpunkten zu einer Referenzebene als Maß für Abrasion gelten.

METTLER et al. (1978) legten ein Meßraster auf die Zahnoberfläche der Gipsreplikas, das sich an lingualen Höckerspitzen als Referenzpunkten orientierte. Mindestens 20 Meßpunkte von der Bezugsebene in vertikaler Richtung erfaßten im Durchschnitt das Oberflächenrelief einer Füllung. Diese vertikalen Werte zwischen Anfangsmodell und Vergleichsmodell wurden subtrahiert, und ihre Differenzen ergaben ein Maß für die Abrasion in den jeweiligen Punkten. Die mittlere Abrasion pro Füllung wurde als statistischer Zentralwert (Mediane) aller gemessenen Punkte definiert.

Nach einem Jahr konnten folgende Verschleißwerte festgestellt werden: AMALGAM 18 ± 58 µm, EPOXYDENT(R) 38 ± 50 µm, ADAPTIC(R) 92 ± 97 µm, CONCISE CAP(R) 146 ± 75 µm.

MEIER und LUTZ (1980) brauchten zu ihrem Tastschnittverfahren nur zwei Meßpunkte je Füllung. Ihre Messungen beschränktensich jedoch auf e i n e n nahezu punktförmigen Bereich zur Bestimmung der Abrasion. Diese Tastschnitte gingen durch den tiefsten Punkt der mittleren bzw. der mesialen oder der distalen Grube und setzten eine Füllungslegung und Ausarbeitung voraus, bei der die okklusalen Kontakte genau in diesen Bereich gelegt werden konnten. Das Maß der Abrasion stellte der vertikale Substanzverlust im Bereich des zentrischen Kontaktes dar, der sich durch Überlagern der Profilkurven vor und nach der Meßperiode ergab. Die Bezugsebene für die vertikalen Abstände war durch die Höckerspitzen definiert.

Nach einem Jahr konnten folgende Werte ermittelt werden: AMALGAM 32 ± 17 µm, ADAPTIC(R) 135 ± 49 µm, ESTIC-MF(R) 28,4 ± 7,2 µm, ESPE-V(R) 55,9 ± 28,3 µm und ISO-V(R) 65,3 ± 24,4 µm.

Mit der Moiré-Topographie ergaben sich höherliegende Werte: ISO-V(R) 69 ± 5 µm, ESTIC-MF(R) 118,5 ± $\frac{5}{6}$ µm und UVIO-FILL(R) 113 ± 5 µm.

Die Unterschiede der Zahlenwerte bei den drei Meßverfahren erklären sich durch die jeweils gewählte Art des Maßes zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit.

Bei allen Meßmethoden zeigen konventionelle Komposits eine deutlich geringere Verschleißfestigkeit als mikrofüllerhaltige Komposits.

C. ZUSAMMENFASSUNG

In Teil A der vorliegenden Arbeit wird das Mikrofüller-Komposit ISOMOLAR (ISO-V)(R) auf seine Verwendbarkeit als okklusionstragendes Füllungsmaterial im Seitenzahnbereich geprüft.

25 Kavitäten der Klasse I und II wurden bei ausgewählten Patienten nach einer modifizierten Methode (angelehnt an die Regeln der adhäsiven Restoration) gefüllt und nach einem bzw. zweieinhalb Jahren klinisch überprüft.

Dabei erwiesen sich nach einem Jahr 14 Füllungen als unverändert und 11 zeigten geringe Auffälligkeiten. Mangels Erreichbarkeit der Patienten konnten nach zweieinhalb Jahren nur noch 4 Restorationen nachuntersucht werden. Diese waren klinisch unverändert.

Um den Substanzverlust der Füllungen im Kontaktpunktbereich ermitteln zu können, wurde ein Meßverfahren entwickelt, das in Teil B dargestellt ist.

Dieses Verfahren ermöglicht es, mit Hilfe der Moiré-Topographie Füllungen über ihre Gipsreplikas optisch zu erfassen und auszumessen, wobei quantitative Aussagen über die Verschleißfestigkeit gemacht werden können.

Bei 5 Restorationen nach 1-jähriger Tragezeit und 4 Restorationen nach 2 1/2-jähriger Tragezeit wurde auf diese Weise der Substanzverlust bestimmt. Der Mittelwert der 1-Jahresergebnisse beträgt 69 µm, jener nach 2 1/2 Jahren 80,5 µm.

Diese Meßergebnisse und die beim Legen der Füllungen gemachten Erfahrungen bestätigen die Aussage von RÜMANN und LUTZ (1980), wonach bei den Mikrofüller-Komposits nicht mehr die ungenügende Abrasionsfestigkeit gegen ihren Einsatz im Seitenzahnbereich spricht, sondern vor allem die nicht vorhandene oder mangelhafte Röntgenopazität, Schwierigkeiten bei der Verarbeitung, die Unsicherheit bezüglich der marginalen

Adaptation sowie die schlechte Demarkation bei der Ausarbeitung.

Wegen der oben angeführten Gründe kann das untersuchte Mikrofüller-Komposit ISO-V(R) als Amalgamersatz nur für Kavitäten der Klasse I im Seitenzahnbereich empfohlen werden.

D. LITERATURVERZEICHNIS

AMEYE, C.: Vergleichende in vivo- und in vitro-Untersuchungen von verschieden aufgebauten Kompositkonstruktionen. Med. Diss. Tübingen 1982

BOWEN, R.L.: Properties of a silica-reinforced polymer for dental restorations. J. Amer. dent. Ass. 66, (1963) 57

BRÄNNSTRÖM, M. und JOHNSSON, G.: Effects of various conditioners and cleaning agents on prepared dentin surfaces: A scanning electron microscopic investigation. J. porsth. Dent. 31, (1974) 422-430

BROOKS, R.E. und HEFLINGER, L.O.: Moiré gauging using optical interference patterns. Appl. Opt. 8, (1969) 935-939

COMPOSITE-COMPENDIUM DMG. Dental-Material-Gesellschaft 1975

DENNISON, J.B., POWERS, J.M. und CHARBENEAU, G.T.: Measurement of in vivo wear on posterior composite restorations. J. dent. Res. 59, (1980) Abstract 202

EBERT, M.: Die Erfassung der menschlichen Trochlea tali mit Hilfe des Isohypsenverfahrens. Med. Diss. Tübingen 1967

EICHNER, K.: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. 4. Aufl., Hüthig, Heidelberg 1981

FINGER, W. und DREYER JØRGENSEN, K.: Polymerisationsinhibition durch Sauerstoff bei Kompositfüllungsmaterialien und Schmelzversieglern. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 86, (1976) 812-824

FINGER, W. und DREYER JØRGENSEN, K.: Porosität von Kompositfüllungsmaterialien. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 87, (1977) 482-489

v. GROENINGER, G. und ARENDS, J.: In-Vivo-Abrasion von Composite-Füllungen: Eine quantitative Untersuchung. Quintess. zahnärztl. Lit. 33, (1982) Ref. Nr. 6351, 883-849

GROSS, A.: Kunststoffe in der Zahnmedizin. ChiuZ 13, (1979) 142-146

GWINNETT, A.J.: Die Verbindung von Versieglungsmaterialien mit dem Zahnschmelz. JOSPD Jan./Febr. (1973a) 21-29

GWINNETT, A.J.: Structural changes in enamel and dentin of factured anterior teeth after acid conditioning in vitro. J. Amer. dent. Ass. 86, (1973b) 117-122

HAHN, S.: Klinische Erfahrungen mit dem Mikrofüller-Komposit UVIO-FILL(R); Entwicklung eines Meßverfahrens nach dem Moirê-Prinzip zur Quantifizierung der Verschleißfestigkeit okklusionstragender Restorationen. Med. Diss. Tübingen 1983

HANDELMANN, S.L. und PAMEIJER, C.H.: Quantitative assessment of sealant wear in vivo. J. prosth. Dent. 40, (1978) 531-533

HIETANEN, J. und RANTANEN, A.V.: Evaluation of different composite finishing methods. Proc. Finn. dent. Soc. 72, (1976) 11

HOLLER, W., WINDISCHBAUER, G., CABAJ, A. und KECK, G.: Moirê-Topographie zur Darstellung von Zahnoberflächen. Biomedizinische Technik 23 (Ergänzungsband), (1978) 213-214

JØRGENSEN, K.D. und ASMUSSEN, E.: Occlusal abrasion of a composite restorative resin with ultrafine filler - an initial study. Quintess. Int. 9, (1978) Report 1646, 73

JØRGENSEN, K.D., HØRSTED, P., JANUM, O., KROGH, J. und SCHULTZ, A.J.: Abrasion of Class I restorative resins. Scand. J. dent. Res. 87, (1979) 140-145

KECK, G., BINDER, W., CABAJ, A., KLÄRING, J. und WINDISCHBAUER, G.: Moiré-topographische Verfahren in der Medizin: Anwendung in der Strahlentherapie. Optik 46, (1976) 431-437

LACMANN, O.: Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf nicht-topographischen Gebieten. S. Hirzel, Leipzig 1950

LENK, H.: Holographie. VEB Georg Thieme, Leipzig 1969

LUTZ, F.: Der Einfluß einer Fluoridapplikation nach der Schmelzätzung auf Adaption und Haftung von Adhäsivfüllungen. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 87, (1977) 712-723

LUTZ, F.: Kompositfüllungen - Rationelleres Ausarbeiten und bessere Randqualität dank neuentwickelten Schleifkörpern (I). Quintess. zahnärztl. Lit. 31, (1980a) Ref. Nr. 6124, 273-284

LUTZ, F.: Kompositfüllungen - Rationelleres Ausarbeiten und bessere Randqualität dank neuentwickelten Schleifkörpern (II). Quintess. zahnärztl. Lit. 31, (1980b) Ref. Nr. 6124, 125-129

LUTZ, F.: Beiträge zur Entwicklung von Seitenzahnkomposits. Eigenverlag Abt. Kariologie, Parodontologie und Präventivmedizin, Zahnärztl. Institut der Universität Zürich, 1980c

LUTZ, F., IMFELD, Th., MÖRMANN, W.: Komposits: Mikrofüller, Füllstoffgehalt und Polierbarkeit. SWISS DENT 2, (1981) Nr. 1-2, 19-24

LUTZ, F., LÜSCHER, B., OCHSENBEIN, H. und MÜHLEMANN, H.R.: Die Entwicklung der perfekt adaptierten, randspaltfreien MOD-Kompositfüllung, in vitro Befunde. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 86, (1976a) 1025-1041

LUTZ, F., LÜSCHER, B., OCHSENBEIN, H. und MÜHLEMANN, H.R.: Adhäsive Zahnheilkunde. Juris Druck & Verlag, Zürich 1976b

MANNERBERG, F.: Isosit, ein neuer Füllungswerkstoff. Quintess. zahnärztl. Lit. 28, (1977) Ref. Nr. 5592, 33-42

MANNERBERG, F.: Fünf Jahre klinische Erfahrungen mit Isosit (I), ein Microfüller enthaltendes Kunststoff-Füllungsmaterial. Quintess. zahnärztl. Lit. 31, (1980) Ref. Nr. 6098, 39-50

McCABE, J.F. und CADDICH, R.J.K.: The finishing of composite restorations. Brit. dent. J. 145, (1978) 101-104

MEIER, Ch.: Eine Methode zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit von Füllungsmaterialien in vivo. Med. Diss. Zürich 1977

MEIER, Ch. und LUTZ, F.: Verschleißmessungen in vivo an okklusalen Komposit- und Amalgamfüllungen. Dtsch. zahnärztl. Z. 33, (1978) 617-622

MEIER, Ch. und LUTZ, F.: Komposits kontra Amalgam: Vergleichende Verschleißfestigkeitsmessungen in vivo: 1-Jahres-Resultate. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 89, (1979) 203-212

MEIER, Ch. und LUTZ, F.: Vergleichende Verschleißfestigkeitsmessungen in vivo zwischen Amalgam und Komposit. Dtsch. zahnärztl. Z. 35, (1980) 489-492

MEINERS, H.: Abformgenauigkeit mit elastomeren Abformmaterialien. Hanser, München/Wien 91ff. 1977

MEINT, R.: Klinische Erfahrungen mit dem Mikrofüller-Komposit ESTIC MICROFILL(R); Entwicklung eines Meßverfahrens nach dem Moirê-Prinzip zur Quantifizierung der Verschleißfestigkeit okklusionstragender Restorationen. Med. Diss. Tübingen 1983

METTLER, P., FRIEDRICH, U. und ROULET, J.F.: Studie über die Abrasion von Amalgam und Komposits im Seitenzahnbereich. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 88, (1978) 324-344

MEURMANN, J.H. und HELMINEN, S.J.: Repair of fractured incisal edges with ultraviolet-light activated fissure sealment and composite resin. Proc. Finn. dent. Soc. 70, (1974) 186-190

MÖRMANN, W., LIETHA-ELMER, E., MEIER, Ch. und LUTZ, F.: Oberflächenanalyse von zwei Kompositfüllungsmaterialien nach unterschiedlicher Feinausarbeitung und Endversieglung. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 87, (1977)667-683

MEWESELY, H. und VENZ, S.: Bearbeitungsmethoden für Composite-Füllungsmaterialien im Modellversuch unter besonderer Berücksichtigung von Zusammensetzung und Gefüge. Dtsch. zahnärztl. Z. 32, (1977) 698-699

NOLDEN, R.: Vergleichende Untersuchungen mechanischer Eigenschaften der derzeitigen selbsthärtenden und lichthärtenden Füllungskunststoffe. Dtsch. zahnärztl. Z. 35 (1980) 506-510

POTTS, R.M., RACZ, W.B. und FARRINGTON, A.P.: The quantitative measurement of wear of occlusal restorations in the clinical situation. J. dent. Res. 55, (1976) Abstract 128

POTTS, R.M., RACZ, W.B. und FARRINGTON, A.P.: The quantitative measurement of wear of occlusal restorations in the clinical situation. Technical Bulletin, Johnson & Johnson, 1978

RAU, G.: Klinische Erfahrungen mit der adhäsiven Restoration nach dem NUVA-System. Zahnärztl. Welt 86, (1977) 296-304

REHBERG, H.J.: Ein Überblick über die werkstoffkundlichen Grundlagen der Composite-Füllungsmaterialien. Zahnärztl. Mitt. 68, (1978) 1191

REINHARDT, K.J. und VAHL, J.: Untersuchungen füllstoffhaltiger und -freier Adhäsive im Vergleich zu einem Composite. Dtsch. zahnärztl. Z. 32, (1977) 867-870

REINHARDT, K.J. und VAHL, J.: Untersuchungen physikalischer Eigenschaften hochglanzpolierbarer Füllungsmaterialien im Vergleich zu Compositen. Dtsch. zahnärztl. Z. 33, (1978) 547-553

RIETHE, P.: Entwicklung der Frontzahnfüllungswerkstoffe. Zahnärztl. Mitt. 68, (1978) 316-321

RIETHE, P., ROTGANS, J. und SCHMALZ, G.: Tierexperimentelle Prüfungen mit einem neuen Füllungsmaterial (Isocap). Dtsch. zahnärztl. Z. 33, (1978) 609-615

ROULET, J.F., METTLER, P. und FRIEDRICH, U.: Studie über die Abrasion von Komposits im Seitenzahnbereich - Resultate nach 3 Jahren. Dtsch. zahnärztl. Z. 35, (1980) 493-497

RÜMANN, R. und LUTZ, F.: Komposits als Amalgamersatz - klinische und experimentelle Resultate. Quintess. zahnärztl. Lit. 31, (1980) Ref. Nr. 6061, 133-143

SCHAEFER, R.: Der neue Dentalwerkstoff Mikrofill. Kulzer ZUe 3, (1979) 2

SCHWIDEFSKY, K.: Grundriß der Photogrammetrie. 4. Aufl. Verlag für Wissenschaft und Fachbuch, Bielefeld 1950

SILVERSTONE, L.M.: Fissure sealants: laboratory studies. Caries Res. 8 (1974) 2-26

STEINHILBER, W.: Beeinflußt das Kiefergelenk die Abrasionsform der Zähne? Med. Diss. Tübingen 1970

TAKASAKI, H.: Moiré topography. Appl. Opt. 9, (1970) 1467-1472

TETZLAFF, W.: Eine Methode zur Darstellung von Oberflächenformen mit Hilfe des Moiré-Verfahrens am Beispiel zahnärztlicher Kiefermodelle. Med. Diss. Tübingen 1978

TSURUTA, T. und ITOH, Y.: Interferometric generation of counter lines on opaque objects. Opt. comm. 1, (1969) 34-36

VIERLING, O.: Die Stereoskopie in der Photographie und Kinematographie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1965

WEBER, H.: Klinische und experimentelle Untersuchungen zur Frage der Abrasionsfestigkeit von Isosit unter besonderer Berücksichtigung der Problematik der Abrasionstestung (I). Quintess. zahnärztl. Lit. 31, (1980a) Ref. Nr. 6035, 117-124

WEBER, H.: Klinische und experimentelle Untersuchungen zur Frage der Abrasionsfestigkeit von Isosit unter besonderer Berücksichtigung der Abrasionstestung (II). Quintess. zahnärztl. Lit. 31, (1980b) Ref. Nr. 6035, 123-129

WINDISCHBAUER, G., KECK, G. und CABAJ, A.: Moiré-topographische Verfahren in der Medizin: Ein Podometer zur Dokumentierung von krankhaften Fußstellungen. Orthop. Technik 1, (1977) 7-8

E. ANHANG

I. Materialien + Geräte

AGFA-ORTHO 25 Professional(R), Dokumentenfilm, Fa. Agfa-Gevaert, 5090 Leverkusen 1

Ahorn-Interdentalkeile, 13 mm superfein, Fa. Hawe-Neos Dental, 6925 Gentilino, Suisse

Arkansas-Steinchen: Flamme Fig. 661, ISO 030 (für Winkelstück), Kugel Fig. 601, ISO 030 (für Winkelstück), Fa. Busch & Co., Postfach 1152, 5250 Engelskirchen

CELLURON(R)-Zahnwatterollen, Fa. Paul Hartmann AG, 7920 Heidenheim/Brenz

CHLORHEXAMED(R), Blend-a-med-Forschung, Fa. Blendax, 6500 Mainz

COLORPLAN CF(R), Objektiv 2,5/90 mm, Fa. Carl Zeiss, 7082 Oberkochen

DePeX(R), Einschlußmittel für Histologie, neutrale Lösung von Polystyrol mit Weichmacher in Xylol, Fa. Serva, Feinbiochemica, 6900 Heidelberg

Diamantierte Schleifkörper für Winkelstück: Flamme 862/016, 862/014 (fein), kleine Flamme 860/010, 860/009 (fein), Kugel 801/018, 801/012 (fein),Fa. D + Z, Goerzallen 307, D-1000 Berlin 37

Diamantierte Schleifkörper für Turbine: Walze 835/012, 836/014, U-Kegel 807/014, Flamme 862/014 (Feinkorn), Fa. D + Z, Goerzallen 307, D-1000 Berlin 37

Digital-Inkrementaler Längenzähler, Fabrikat Heidenhain, Fa. Dr. Johannes Heidenhain, 8225 Traunreut

DOKUMOL(R), Fa. Tetenal Photowerk, Postfach 2029, 2000 Norderstedt

Einmalpinsel, Fa. Vivadent, FL-9494 Schaan/Liechtenstein

ELMEX FLUID(R), Fa. Wybert GmbH, 7850 Lörrach

ES-Kompressen 10 x 10 cm, Fa. Paul Hartmann AG, 7920 Heidenheim/Brenz

ESTIC MICROFILL(R), Fa. Kulzer & Co. GmbH, Bereich Dental, 6393 Wehrheim/Ts.

"Gerade Linien", Linienraster, 50 %-lin. 27,5 Nr. 03299, Fa. ALFAC Novotypie, Rue de l'Industrie 12, B-1400 Nivelles

Graphische Kunstanstalt, Erich Maurer, Kelternstr. 16, 7400 Tübingen

HARVARD(R)-Zement normalhärtend, Farbe Nr. 3, Pulver und Flüssigkeit, Fa. Richter und Hoffmann, Harvard Dental-Gesellschaft, D-1000 Berlin

Haftlack-Silispray(R), Fa. Dentax-Dental, Karl Huber KG, 7500 Karlsruhe

Halbe Abdrucklöffel, perforiert, DR 721, DR 724, DR 731, DR 734, Fa. Aeskulap-Werke AG, 7100 Tuttlingen

INTRA-matic(R), Winkelstück 20 A, INTRA-Kopf 68 C, Fa. Kaltenbach und Voigt, 7950 Biberach

ISOMOLAR (ISO-V)(R), Fa. Vivadent, FL-9494 Schaan/Lichtenstein

ISOPAST(R), Fa. Vivadent, FL-9494 Schaan/Liechtenstein

KAVO ALL AIR(R), Turbine, Fa. Kaltenbach und Voigt, 7950 Biberach

KERR Impression Compound(R) Stangengrün 60064, Fa. Kerr GmbH, Postfach 410540, 7500 Karlsruhe 41

Leinenstreifen (Linen Finishing Strips), Fa. Moyco Industries INC, Philadelphia, PA 19132, USA

Mandrel Mounted Rubber Polishing Cups, Fa. Produits Detaires S.A.,Vevey, Suisse

Matrizensystem nach Tofflemire; Matrizen-Bänder 0,05 mm, Nr. 1 und Nr. 13 mit Matrizenhalter, Fa. Produits Dentaires S.A., Vevey, Suisse

MIRANDA(R), Kleinbildkamera, Fa. AIC-Fototechnik GmbH, Schulze-Delitzsch-Str. 7, 7022 Leinfelden/Echterdingen

NIMETIC(R), Composite Polierpaste, Fa. ESPE, Fabrik pharmazeutischer Präparate GmbH, 8031 Seefeld

NOVOFLEX(R), Objektiv Macro 105, Fa. NOVOFLEX Fotogerätebau, Donaustr. 78, 8940 Memmingen

Okklusionsprüffolie (schwarz und rot), einseitig, 22 mm x 80 mm, GHM-Hanel-Medizinal, 7440 Nürtingen

Parallelometer, Fa. Degussa AG, Postfach 420, 7530 Pforzheim 1

PRADOVIT(R), Diaprojektor, Fa. Carl Zeiss, 7082 Oberkochen

PRADO(R), Diaprojektor mit Objektiv 1:2,5/150 mm, Typ Hektor, Fa. Ernst Leitz GmbH, Hausertorwerk, 6330 Wetzlar

REOCAP(R), Fa. Vivadent, Fl-9494 Schaan/Liechtenstein

Shimstock-Folie, Rettungsdecke ADAC

SILAPLAST(R) und SILASOFT(R), Fa. Dentax Dental, Karl Huber KG, 7500 Karlsruhe

Silikonpolierer: Flamme, Kelch und Linse, Fa. Vivadent, Fl-9494 Schaan/Liechtenstein

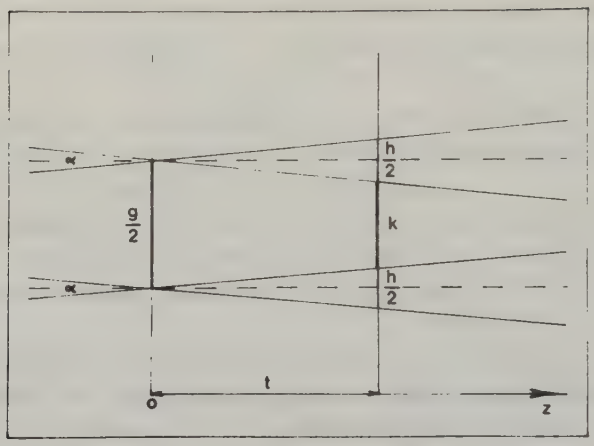
Universal-Meßmikroskop, Fa. Carl Zeiss, 7082 Oberkochen

UVIO-FILL(R), Fa. Espe, Fabrik Pharmazeutischer Präparate GmbH, 8031 Seefeld/Ob.

VELMIXSTONE(R), Modellgips extra hart, rosa, Fa. KERR GmbH, Postfach 410540, 7500 Karlsruhe

Zahnreinigungsbürstchen, Kelche, Fa. Polirapid Dr. Montemerlo & Co., Hardenbergstr. 18, P.O.Box 309, 7700 Singen

II. Mathematische Abhandlung



Einfluß der Beleuchtungsapertur α

In Abhängigkeit von z gilt für den Kernschatten k: $k(z) = g/2 - h(z)/2$. Für kleine Winkel α gilt $h/2 = \alpha \cdot z$, daraus folgt: $k(z) = g/2 - \alpha \cdot z$.

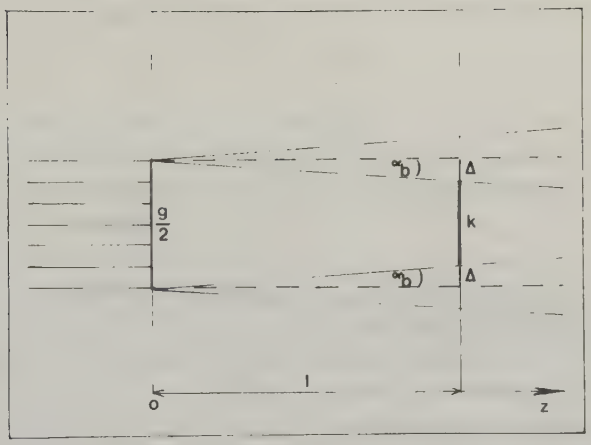
Das Verhältnis $\chi = k(z)/h(z)$ ist dann $\chi = \dfrac{g/2 - \alpha \cdot z}{2 \cdot \alpha \cdot z}$

und es gilt $(2\chi+1) \cdot z \cdot \alpha = g/2$

Damit ein kontrastreicher Gitterschatten entsteht, darf χ nicht zu klein werden. Eine willkürliche aber sinnvolle Forderung ist $\chi \geq 1$. Dies bedeutet anschaulich, daß der Kernschatten $k \geq 2/3$ von $g/2$ bleibt.

Benötigt man für die Messung einen nutzbaren Tiefenbereich $z_{max} = t$, so erhält man für die Gitterkonstante g die Bedingung $g \geq 2\ (2\chi+1) \cdot t \cdot \alpha$; also $g \geq 6 \cdot t \cdot \alpha$.

Bei der vorliegenden Arbeit betrug $t = 3$ mm, $\alpha = 6{,}6$ mrad; dementsprechend sind für g Werte größer oder gleich ≈ 120 µm gefordert.



Einfluß der Beugung am Gitter

Durch die Beugung des Lichtes um den Winkel $\alpha_b = \frac{\lambda}{g}$ wird der Kernschatten k in einem Randbereich $\Delta = \alpha_b \cdot z$ aufgehellt und verschmälert. In Abhängigkeit von z erhält man die Kernschattenbreite: $k(z) = g/2 - 2\cdot\Delta$; $k(z) = g/2 - 2\cdot\alpha_b\cdot z$

Bildet man das Verhältnis von Kernschatten zu Halbschatten

$\gamma = k(z)/2\Delta = \frac{g/2 - 2\alpha_b\cdot z}{2\alpha_b\cdot z}$ so folgt für g/2:

$g/2 = 2\,(\alpha_b\cdot z)\cdot\gamma + 2\alpha_b\cdot z$ und daraus ergibt sich (wegen

$\alpha_b = \lambda/g$) $g = \sqrt{4\,(\gamma+1)\cdot\lambda\cdot z}$

Wird wie oben gefordert, daß der Kernschatten $k \geq 2/3$ von g/2 ist (entsprechend $\gamma = 2$), erhält man für die Gitterkonstante g die Bedingung $g \geq \sqrt{12\cdot\lambda\cdot l}$, bei $z_{max} = l$.

Für eine mittlere Wellenlänge $\lambda = 500$ nm und $l = 3$ mm ergibt sich eine Gitterkonstante, die größer oder gleich ≈ 130 µm ist.

Herrn Prof. Dr. Dr. P. Riethe möchte ich für die Überlassung des Themas und die großzügige Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit herzlich danken.

Mein Dank gilt weiter Herrn Prof. Dr. H. Haselmann und Herrn Prof. Dr. F. Habermalz vom Institut für Wissenschaftliche Mikroskopie der Universität Tübingen für ihre wertvollen Ratschläge.

Besonders möchte ich Herrn Dr. H. Lichte vom Physikalischen Institut der Universität Tübingen für sein Verständnis und seine jederzeit gewährte Unterstützung danken.

Herrn G. Schubring vom Zentrum für Datenverarbeitung der Universität Tübingen gilt mein Dank für sein Entgegenkommen bei der statistischen Auswertung und Darstellung der Ergebnisse.

Ferner danke ich Herrn Dr. W. Lindemann und Herrn Dipl.-Phys. D. Lukas für ihre Anregungen, Fräulein R. Beth und Fräulein M. Retig für die fotografische Unterstützung sowie Fräulein U. Meckes, Herrn J. Stopper und Herrn W. Künstle für ihre wertvolle Hilfe.

Lebenslauf

Am 16. März 1947 wurde ich, Hartmut Wilhelm Rein, als Sohn des Metzgermeisters Otto Rein und seiner Ehefrau Wilhelmine, geb. Wacker, in Stuttgart geboren.

Im April 1953 wurde ich in die Altenburg-Schule in Bad Cannstatt als Schulanfänger eingestuft. 1957 wechselte ich auf die Jahn-Realschule, wo ich im März 1963 die Mittlere Reife erlangte.

Ab April 1963 bis März 1966 absolvierte ich eine Lehre als Fleischer in der Metzgerei meines Vaters in Bad Cannstatt. Danach arbeitete ich weiterhin zu Hause als Fleischergeselle bis zum Beginn meines Wehrdienstes. Diesen leistete ich vom 1.7.1968 bis zum 31.12.1969 in Münsingen ab. Zurückgekehrt arbeitete ich wieder zu Hause.
Im Juni 1972 bestand ich in Landshut die Meisterprüfung.

Am 1. März 1972 begann ich in Lemgo an der Fachhochschule Lippe das Studium der Lebensmitteltechnologie, das ich am 4. April 1975 mit dem Ing. (grad.) der Lebensmitteltechnologie abschloß.

Zum Wintersemester 1979 bekam ich die Zulassung zum Studium der Zahnmedizin in Tübingen. Nachdem ich nach zwei Semestern die naturwissenschaftliche Vorprüfung und nach weiteren drei Semestern die zahnärztliche Vorprüfung bestand, legte ich am 10.12.1980 das Staatsexamen ab.

Seit 1. April 1981 bin ich als wissenschaftlicher Angestellter in der Abteilung für Zahnerhaltung des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universität Tübingen tätig.

Offsetdruck Spengler
Lessingstraße 4 · 7401 Neustetten 1
Telefon (0 74 72) 2 21 45